

Trag- und Verformungsverhalten des Betons unter langzeitiger Zugbeanspruchung

Schlußbericht

vorgelegt von

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Karl Kordina

Prof. Dr.-Ing. Lothar Schubert

Dipl.-Ing. Uwe Troitzsch

Leipzig, im Juni 1998

Gefördert mit Forschungsmitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft
unter Az. Schu 780/1 und Az. Ko 204/45

Der Bericht besteht aus 38 Blatt und 37 Anlagen.

Vorwort

Einem Forschungsantrag von Herrn Prof. Dr.-Ing. Lothar Schubert folgend, förderte die Deutsche Forschungsgemeinschaft das Vorhaben

„Trag- und Verformungsverhalten des Betons unter langzeitiger Zugbeanspruchung“

ab 1990/91 (Az.: Schu 780/1) an der damaligen Technischen Hochschule Leipzig. Die unerwartete Auflösung der TH Leipzig und Gründung der FH „Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig“ (HTWK) brachte die Durchführung des Forschungsvorhabens in Schwierigkeiten und veranlaßte außerdem Herrn Prof. Schubert, sich aus dem aktiven Lehrbetrieb zurückzuziehen.

Die weitere Durchführung des Vorhabens wurde der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt Leipzig (MFPA) übertragen, deren wissenschaftlicher Leiter damals Herr Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Karl Kordina war. Demgemäß erfolgte die weitere Förderung des Vorhabens unter Az.: Ko 204/45, dessen Betreuung von Herrn Prof. Kordina zusammen mit Herrn Prof. Schubert und dem Leiter der Abteilung Stahlbeton und Spannbeton der MFPA, Herrn Dr.-Ing. Meichsner, wahrgenommen wurde.

Durchführung und Auswertung der Versuche lag in den Händen von Herrn Dipl.-Ing. Uwe Troitzsch, der von den Mitarbeitern der Abteilung, insbesondere von den Herren H.-P. Löwe, M. Rudolph und I. Wojan unterstützt wurde.

Die Autoren möchten an dieser Stelle vor allem der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die verständnisvolle und entgegenkommende Förderung dieses Vorhabens danken, so daß es trotz mancher Schwierigkeiten abgeschlossen werden konnte. Zugleich danken die Autoren allen jener Mitarbeitern der MFPA, die durch ihre bereitwillige Mitarbeit das Vorhaben unterstützt haben.

Die Autoren

Leipzig, im Juni 1998

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung
- 2 Überblick
 - 2.1 Zug- und Kriechversuche
 - 2.2 Relaxationsversuche
 - 2.3 Definition der Versuchsdaten
- 3 Versuchsprogramme
 - 3.1 Zugkriechen
 - 3.2 Spannungsrelaxation
 - 3.3 Schwindverformungen
 - 3.4 Nebenversuche
- 4 Herstellung und Festigkeiten der Probekörper
 - 4.1 Abmessungen
 - 4.2 Beton
 - 4.3 Kurzzeit-Festigkeiten
 - 4.4 Schwindmessungen und Gewichtsveränderungen
- 5 Ergebnisse der Zug-Kriech- und Schwindmessungen
 - 5.1 Übersicht
 - 5.2 Ergebnisse der Kriech- und Schwindmessungen
 - 5.3 Spezifisches Zugkriechen
 - 5.4 Kriechzahlen
 - 5.5 Rückkriechen
 - 5.6 Zusammenstellung der Ergebnisse
- 6 Vergleich mit älteren Kriechversuchen
 - 6.1 Druckkriechen
 - 6.2 Zugkriechen
- 7 Relaxation
 - 7.1 Theoretische Lösung
 - 7.2 Auswertung der Relaxationsversuche
- 8 Zusammenfassung
- 9 Literatur
- 10 Anhang
 - Kriechversuche
 - Rückkriechversuche
 - Relaxationsversuche
 - Versuchseinrichtung
 - Mischungsprotokolle
 - Zementanalyse
 - Fotobeilagen

1 Einleitung

Die Zugfestigkeit sowie die durch Zugkriechen verursachten Spannungsumlagerungen des Betons beeinflussen maßgeblich die Entstehung von Rissen sowie die Rißbreiten in der Zugzone von Stahlbeton- und gegebenenfalls auch in Spannbetonkonstruktionen.

Über das Trag- und Verformungsverhalten der Zugzone bei langandauernder Beanspruchung ist nur Weniges bekannt.

Im Unterschied zu einer Vielzahl entsprechender Forschungsarbeiten für Beton unter Druckbeanspruchung liegen für einachsige Zugversuche mit langzeitiger Beanspruchung und den damit verbundenen Kriechverformungen kaum Untersuchungen vor. Darüber hinaus sind die vorhandenen Resultate und Aussagen widersprüchlich. Die Ursache ist einerseits die beschränkte Anzahl derartiger Versuche und andererseits die Randbedingungen, welche den einaxialen Zugversuch, insbesondere den einaxialen Dauerstandzugversuch gegenüber anderen Versuchsdurchführungen vergleichsweise wesentlich fehlerempfindlicher, aufwendiger und anspruchsvoller gestalten.

Zunächst ist es notwendig, genauere Kenntnisse über die Einflüsse des Erstbelastungsalters und der Spannungshöhe auf den zeitlichen Verlauf der Kriechverformungen sowie die Entlastungsvorgänge zu erarbeiten. Es soll die Spannungsrelaxation und der zeitliche Rückgang der Zugspannungen nach dem Überschreiten der Zugfestigkeit verfolgt werden, um das Zugtragverhalten des Werkstoffes Beton möglichst einer zusammenhängenden Beschreibung zuführen zu können.

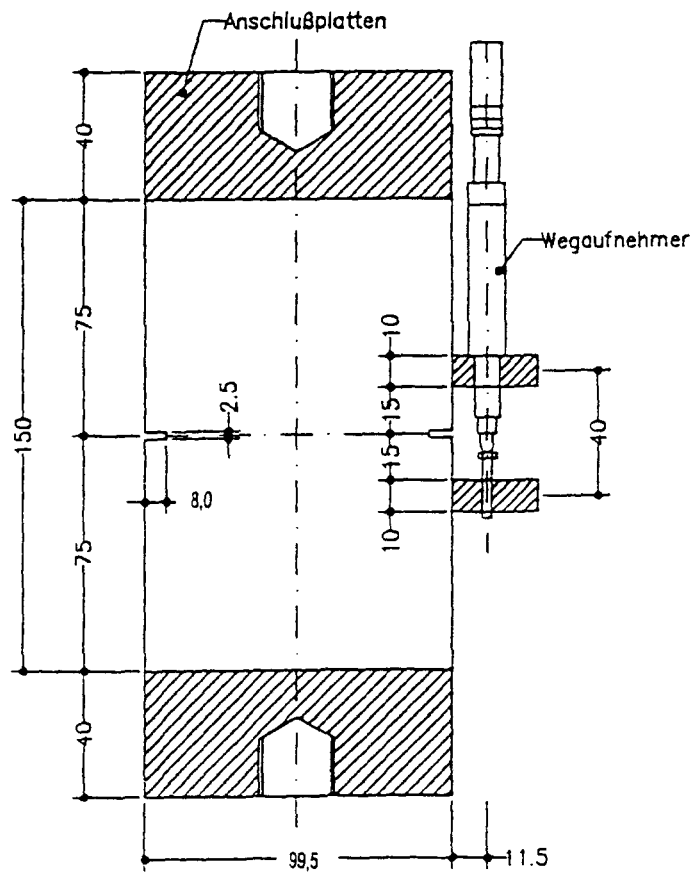
Der Forschungsstand zum Thema Zugkriechen von Beton muß derzeit noch als unzureichend eingeschätzt werden. Insofern soll die vorliegende Arbeit dazu dienen, den Vorsprung der Forschungen zum Druckkriechen zu vermindern. Weitere detaillierte Untersuchungen sind erforderlich. Dabei ist die Anwendung der modernen Rechentechnik ein wertvolles Hilfsmittel, welches den Umfang von Laboruntersuchungen begrenzen kann.

2 Überblick

Bei der Durchführung der Versuche kamen zylinderförmige Versuchskörper - \varnothing 100 mm, L = 150 mm – zur Anwendung, welche zu bestimmten Zeitpunkten zu je vier Stück aus einem quaderförmigen Betonblock (30-cm-Würfel) mittels Naßbohrverfahren entnommen wurden. Die Verwendung von zylindrischen Probekörpern erwies sich als zweckmäßig, um den Ausschluß von Exzentrizitäten bei der Versuchsdurchführung so weit wie möglich zu gewährleisten.

Für die Kurzzeitzugversuche sowie bei der Durchführung von Relaxationsversuchen kamen induktive Weggeber zur Anwendung. Die Relaxationskörper erhielten eine in Probekörpermitte umlaufende eingesägte Kerbe mit runder Kerbwurzel (Bild 1). Mit diesen Kerben wird die Bildung einer Störzone an einer vorher bekannten Stelle erzwungen. Dieser Bereich wird als Meßstrecke für den verformungsgesteuerten Versuch genutzt.

Die Kurz- und Langzeitzugversuche wurden an zylindrischen Probekörpern ohne Kerben durchgeführt. Die Lasteintragung in den Versuchskörper erfolgte über aufgeklebte Stahlplatten. Um eine ungewollte Lastexzentrizität zu vermeiden, wurden zwischen den aufgeklebten Stahlplatten und der Prüfmaschine Gelenke angeordnet. Über die gesamte Körperlänge stand für die Dehnungsmessung mit Dehnungsmeßstreifen eine konstante Querschnittsfläche zur Verfügung.



Detail: Kerbe

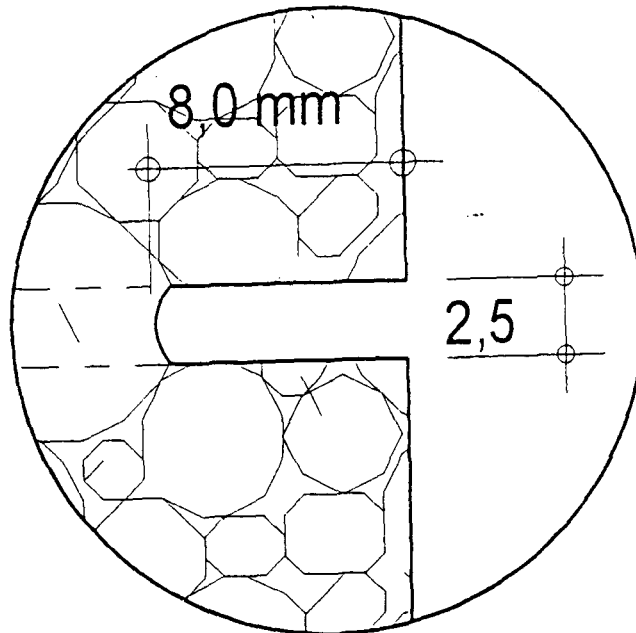


Bild 1: Prüfkörper (schematisch) mit Darstellung der Kerbe

Zur Herstellung der Probekörper wurde Beton B 35 vorgesehen. Dabei sollte ein üblicher Beton zur Anwendung kommen, dessen Größtkorn jedoch auf 8 mm begrenzt wurde. Die Festigkeitsentwicklung des Betons wurde erfaßt.

Schwindmessungen sollten 1 Woche nach dem Herausbohren begonnen werden. Die Lagerung aller Probekörper erfolgte nach dem Herausbohren im Klimaraum. Als Zeitpunkt des Herausbohrens der Probekörper (Bohrkerne) wurden folgende Termine vorgesehen:

2 Monate – 7 Monate – 12 Monate.

Folgende Versuchsreihen sind vorgesehen:

Unversiegelte und versiegelte Kriech- und Schwindkörper, Belastungsstufen 0,4, 0,6 und 0,7 der Kurzzeitzugfestigkeit unter mittigem Zug.

2.1 Zug- und Kriechversuche bei zentrischer Zugbeanspruchung

Das Betonalter bei Versuchsbeginn wurde wie folgt variiert:

3 Monate 8 Monate 13 Monate.

Es wurden an je 2 Versuchskörpern die Kurzzeitzugfestigkeit bei einer Belastungsgeschwindigkeit von $0,05 \text{ N/mm}^2\text{s}$ ermittelt. Die Kriechverformungen bis zum eventuellen Bruch wurden bei Lastgraden von

0,4 0,6 und 0,7,

bezogen auf die Kurzzeitfestigkeit, gemessen. Die Kriechversuche wurden jeweils nach 4 Monaten abgebrochen, da erwartet wird, daß das Erdkriechmaß zu diesem Zeitpunkt abschätzbar ist. Parallel zu den Kriechversuchen wurde das Schwinden des Betons an gleichartig gelagerten, jedoch unbelasteten Proben beobachtet.

Es wurden unversiegelte und versiegelte Versuchsreihen vorgesehen.

2.2 Relaxationsversuche bei Beanspruchungen im Bereich des abfallenden Astes des Werkstoffgesetzes für Beton unter Zugbeanspruchung

Nach verformungsgesteuertem Überfahren des Zugspannungsmaximums wurden die Verformungen an je 3 Versuchskörpern bei Lastgraden von

0,4 und 0,6,

bezogen auf das Spannungsmaximum, konstant gehalten und die Spannungsrelaxation gemessen. Das Betonalter der Proben bei Versuchsbeginn wurde wie bei den Kurzzeit- und Kriechversuchen in den Stufen

3 Monate und 8 Monate

variiert.

Zum dehnungsgeregelten Überfahren des Spannungsmaximums wurden gekerbte Proben vorgesehen, die mit Weggebern ausgerüstet waren (vgl. Bild 1).

2.3 Definition der Versuchsdaten

Als Kriechen wurde die an den belasteten Körpern gemessene Gesamtverformung ε_{ges} , abzüglich der Augenblicksverformung ε_{el} , zuzüglich der an den unbelasteten Körpern gemessenen Schwindverformung ε_s definiert und mit ε_K bezeichnet.

Die Kriechverformung ist unter den hier vorliegenden Versuchsbedingungen unter konstanter Zugbeanspruchung daher:

$$\varepsilon_K = \varepsilon_{\text{ges}} - \varepsilon_{\text{el}} + \varepsilon_s$$

Die Größe ε_{el} wurde an E-Modul-Körpern ermittelt. Angesichts der Unsicherheiten, die sich durch mehrfache E-Modul-Messung an ein und demselben Körper ergeben können, wurde der E-Modul als ein von der Zeit unabhängiger Wert angenommen und der Auswertung zugrunde gelegt.

Die Kriechkörper wurden nur bis zu max. 70 % ihrer zentrierten Kurzzeit-Zugfestigkeit beansprucht. Versuche mit etwas höherer Dauerlastbeanspruchung scheiterten durch Bruch in der Klebefläche, überwiegend aber durch verfrühten Zug-Bruch der Versuchskörper.

Außerdem wurden die ermittelten Kriechverformungen ε_K durch die aufgebrachte Kriechspannung σ_K geteilt und der Bezugswert

$$\overline{\varepsilon_K} = \varepsilon_K / \sigma_K$$

ermittelt. Diese Bezugsgröße gibt die Kriechdehnungen unter einer Spannung von $= 1 \text{ N/mm}^2$ an und gilt im Bereich des spannungsproportionalen Kriechens als spannungsunabhängiger Vergleichswert.

Bei der Auswertung wurde unterstellt, daß das Längskriechen einem Endwert zustrebt. Dieser Endwert wurde nach dem Verfahren von A. D. Roß [1] ermittelt. Man versucht dabei, den bekannten Teil der Kriechkurve einer Hyperbel anzupassen, deren Asymptote den Endwert $\varepsilon_{K\infty}$ angibt. Die Gültigkeit dieses Verfahrens wurde u.a. auch von O. Wagner [2] näher untersucht und unter der Voraussetzung bestätigt, daß der Verlauf von ε_K für einen genügend langen Zeitraum bekannt ist.

3 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm gliedert sich in Haupt- und Nebenuntersuchungen. Zu den Hauptuntersuchungen gehören die Versuche zum Zugkriechen, zum Schwinden und zur Zugspannungsrelaxation. Die Nebenversuche dienen zur Einordnung und Abgrenzung der in den Hauptversuchen erzielten Meßergebnisse.

3.1 Zugkriechen

Die Versuche wurden an unversiegelten und versiegelten Probekörpern durchgeführt. Hierbei wurden die Einflüsse Belastungsalter und Belastungsgrad jeweils getrennt untersucht. Es wurden drei Alterungsstufen mit einer Belastungsdauer von je 4 Monaten geplant. Die Versuche fanden unter konstantem Klima statt - Normklima - DIN 50 014 – 23 °C/50 % r.F. Die Längsverformungen der Probekörper wurden mittels Dehnmeßstreifen gemessen; die Dehnmeßstreifen der belasteten Probekörper wurden mit den Dehnmeßstreifen der unbelasteten Probekörpern (Schwindkörper) als Wheatstonsche Meßbrücke verknüpft, so daß das

Schwinden bereits beim Messen von ε_{ges} kompensiert wurde. Die Anordnung der Meßstreifen auf den Probekörpern ist im Anhang ersichtlich. Diese Form der Messung führte dazu, daß weder die tatsächlichen Verformungen der belasteten noch die der unbelasteten Probekörper (Schwindkörper) angezeigt und erfaßt werden konnten. Lediglich zusätzlich an den Schwindkörpern vorgenommene Schwindmessungen standen zur Verfügung. Der Grund für dieses unbefriedigende Vorgehen war der Mangel an geeigneten Vielstellen-Meßanlagen.

Je Alterungsstufe wurden 6 unversiegelte und 6 versiegelte Kriechkörper untersucht, wobei die Kriechspannung jeweils 40, 60 und 70 % der mittigen Kurzzeit-Zugfestigkeit betrug.

Als Alterungsstufen wurden 3, 8 und 13 Monate gewählt.

3.2 Spannungsrelaxation

Für die Durchführung dieser Versuche wurde eine servohydraulische Prüfmaschine mit integrierter Kraftmeßdose in Verbindung mit einer rechnerprogrammierten Steuerung eingesetzt.

Meßgrößen sind Zeit, Kraft und Verformung.

Die Zeitmessung wurde parallel zur Datenerfassung vorgenommen.

Zur Verformungsmessung dienten 4 induktive Wegaufnehmer. Da diese Messungen insbesondere den Bereich nach dem Erreichen der maximalen Spannung zum Inhalt haben, wurde aus Gründen der Steuerbarkeit des Versuches eine Kerbe in den Probekörper eingefräst (siehe hierzu Bild 1).

Die Versuchsdauer betrug bis zu 2 Tagen.

Auch diese Versuche wurden unter Normklima - DIN 50 014 – 23 °C/50 % r.F. durchgeführt.

Je Alterungsstufe wurden jeweils 6 Versuchskörper untersucht; das Spannungsniveau beim Einstellen der Verformungskonstanz wurde mit 0,4 bzw. 0,6 der zugeordneten Kurzzeit-Zugfestigkeit festgelegt. Durch Versagen des Kühlsystems der Prüfmaschine wurde leider in einer Mehrzahl von Versuchen ein verfrühtes Versuchsende erzwungen.

3.3 Schwindverformungen

Kriechen wird durch gleichzeitiges Schwinden überlagert; Schwindmessungen sind daher insbesondere bei Zugkriechversuchen von großer Wichtigkeit.

Schwindmessungen unbelasteter Ausgleichskörper \varnothing 100, L = 150 mm wurden an versiegelten und unversiegelten Probekörpern durchgeführt. Die zylindrischen Probekörper für die jeweiligen Belastungsalter entsprachen dem Alter der Kriechkörper. 3 Dehnungsmeßstreifen je Schwindkörper dienten der Kompensation der Schwindverformung der belasteten Körper. Außerdem wurden unabhängige elektronische Schwindmessungen durchgeführt.

3.4 Nebenversuche

Die Nebenversuche betreffen im einzelnen

- Kurzzeitzugversuche
- Kurzzeitdruckversuche
- Messung von Gewichtsänderungen.

3.4.1 Kurzzeitzugversuche

Der Mittelwert aus je 3 Kurzzeitzugversuchen diene für das jeweilige Belastungsalter:

- zur Kalibrierung der Belastungsgrade der Kriechversuche
- zur Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der Zugfestigkeit
- zum Vergleich mit den Bruchspannungen an den gekerbten Probekörpern für Relaxationsversuche.

Anzahl der Probekörper [Stück]

Belastungsalter	3 Monate	8 Monate	13 Monate
Probenanzahl	3	3	3

3.4.2 Kurzzeitdruckversuche

Der Mittelwert aus je 2 Würfeldruckprüfungen, sowie der Mittelwert aus 3 Zylinderdruckversuchen, je Belastungsalter wurde zum Zwecke

- der Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der Druckfestigkeit
- des Vergleiches mit der Festigkeitsentwicklung der Zugfestigkeit
- zu Vergleichszwecken bei der Auswertung

durchgeführt.

Anzahl der Probekörper [Stück]

Belastungsalter	3 Monate	8 Monate	13 Monate
Würfel 150x150x150	2	2	2
Zylinder Ø100, L = 100	3	3	3

3.4.3 Messung der Gewichtsänderungen

Trotz konstanter Umgebungsbedingungen während eines Dauerstandversuches finden Wechselwirkungen des inneren Feuchtehaushaltes einer Probe mit der Umgebung statt. Der anzustrebende Idealzustand wäre die Ausgleichsfeuchtigkeit der Probe mit ihrer Umgebung. Da elektronische Feuchtigkeitsmessungen an Beton entweder umstritten oder sehr kostenintensiv und zerstörende Verfahren unzweckmäßig sind, wurden zusätzliche Vergleichskörper mit identischer Präparation angefertigt, um Präzisionswägungen durchführen zu können. Die Schwindkörper schieden hierfür von vornherein aus, da die elektronische Verbindung mit der Meßanlage den Transport zur Waage ausschloß. Der Zeitraum für die Vergleichswägungen orientierte sich an den Kriech- und Schwindmessungen, wobei die manuellen Wägungen auch nach Ablauf der Belastungsdauer der jeweiligen Alterungsstufe der Kriechversuche fortgesetzt wurde.

Anzahl der Vergleichswägekörper [Stück]

Alterungsstufe	3 Monate	8 Monate	13 Monate
versiegelt	-	2	2
unversiegelt	1	2	2

4 Herstellung und Festigkeiten der Probekörper

4.1 Probekörper – Abmessungen

Frühere Untersuchungen ergaben, daß eine zylindrische Probenkörperform zahlreiche Vorteile gegenüber einem Rechteckquerschnitt aufweist. Außerdem sollten die Proben frei von Randeinflüssen (Schalung) sein. Deswegen wurden die Probekörper aus 30-cm-Würfeln in Form von Bohrkernen $\varnothing \sim 100$ mit 300 mm Länge herausgebohrt, deren Stirnseiten abgetrennt wurden, so daß sich endgültig Probekörper $\varnothing 100/150$ mm ergaben.

Es wurden folgende Abmessungen festgelegt:

- Zugkriechen: Bohrkern $\varnothing 100$ mm/L = 150 mm
- Spannungsrelaxation: Bohrkern $\varnothing 100$ mm/L = 150 mm mit Kerbe in Probenmitte umlaufend (siehe Bild 1), geschnitten im Naßverfahren mit Diamantsägeblatt
- Druckfestigkeit: Würfel 150 mm sowie Bohrkern $\varnothing 100$ mm/L = 100 mm
- Schwindmessungen und Gewichtsmessungen: Bohrkern $\varnothing 100$ mm/L = 150 mm

4.2 Beton

Aus eigenen Erfahrungen und aus der Literatur ist bekannt, daß Zugkriechversuche an Beton eine äußerst präzise und detaillierte Arbeitsweise abverlangen. Dem hohen Versuchsaufwand steht die Streuung der Materialeigenschaften gegenüber, weil das Zug-Trag-Verhalten von zahlreichen Einflußgrößen abhängt. Um einerseits mit den vorhandenen Versuchseinrichtungen das Versuchsprogramm realisieren zu können, andererseits die Versuchszahl bei Wahrung der gewünschten Aussagequalität auf ein vernünftiges Maß zu reduzieren, mußte die Streuung der Materialeigenschaften so weit wie irgend möglich vermindert werden. Der Kennliniencharakter des definierten Einzelversuches war bei der vorliegenden Untersuchung anzustreben. Der Beton der Versuchskörper wurde daher aus einer Mischung an einem Tage verarbeitet.

4.2.1 Betonrezeptur

Um baupraktische Vergleichbarkeit zu erreichen, wurde ein Baustellenbeton gewählt mit Größtkorn 8 mm. Dies war deswegen erforderlich, um zu große Einzelkörner im Vergleich zu den verwendeten relativ kleinen Probenabmessungen zu vermeiden, die die Streuung der Ergebnisse negativ beeinflussen könnten.

Zur Gewährleistung einheitlicher Herstellungsbedingungen wurde ein Transportbeton B 35 mit einem W/Z-Wert von 0,55 bestellt, so daß aus einer Lieferung die gesamte Anzahl der 30-cm-Würfel (Grundkörper) betoniert werden konnte. Der Lieferschein sowie weitere Angaben zur Betonrezeptur sind im Anhang A 36 des Berichtes enthalten.

Als Betonrezeptur wurde gewählt:

Zement Pz I 32,5 R	350	kg/m ³	„Karsdorf“ (Anhang A 29)
Zusatzstoff	40	kg/m ³	Steinkohlenflugasche S-B/F DIN EN 450 „Schölven“
Zusatzmittel	1,75	kg/m ³	Betonverflüssiger „Muraplast“ FK 88 (BV) MC Bau-chemie Bottrop
Wasser	184	l/m ³	w/z = 0,55
Sand 0,2	1000	kg/m ³	
Kies 2/8	800	kg/m ³	Rohdichte 2,31 kg/m ³
			Ausbreitmaß 55 cm

Die petrographische Zusammensetzung nach Prüfzeugnis 228/5132/96 des IBU Großräschen zeigte

Quarz/Quarzit	56,3 Masse-% in Körnung 4/8
Magmatite, Granit/Gneis	33,5 Masse-% in Körnung 4/8
Porphyr	5,7 Masse-% in Körnung 4/8
Sandstein/Schiefer/Flint	4,5 Masse-% in Körnung 4/8

Die Herstellung der Grundkörper (30-cm-Würfel) erfolgte am 23.10.1996.

Die Verdichtung der Probekörper erfolgte mit einer Rüttelflasche \varnothing 28 mm mit 12.000 Vibrationen/min, Drehzahl 4400 U/min (vgl. Anlage).

Die Druckfestigkeiten dieses Betons, bestimmt am 150-mm-Würfel, betrugen nach Angabe des Transportbetonwerkes nach 28 Tagen $36,5 \text{ N/mm}^2$. Der weitere Festigkeitsverlauf ist Bild 2 zu entnehmen.

4.2.2 Herstellung der Probekörper

Aus einem Grundkörper $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}$ lassen sich 4 Bohrkern $\varnothing 100 \text{ mm}$ entnehmen, wobei ein ausreichender Abstand sowohl zum Schalungsrand als auch von Bohrkern zu Bohrkern gewährleistet bleibt. Außerdem ist dieser Grundkörper gerade noch ohne technischen Aufwand handhabbar. Aus der erforderlichen Probenanzahl zuzüglich einer Reserve für Wiederholungen (Vergleichs-, Zusatz- oder Nachuntersuchungen) ergab sich eine Anzahl der Grundkörper von 30 Stück. Diese wurden in einer Batterieschalung hergestellt.

Für die Herstellung der Druckfestigkeits-Würfel wurden herkömmliche Stahlschalungen vorgehalten.

In einem Alter von 2 Tagen wurden die Grundkörper ausgeschalt, dann 3 Tage lang feucht gehalten und anschließend in einem Klimaraum bei Normklima gelagert.

Vierzehn Tage vor dem geplanten Versuchsbeginn (Belastungsbeginn) wurde die erforderliche Anzahl an Bohrkernen im Naßverfahren gewonnen und ebenfalls im Naßverfahren durch Entfernen der Endstücke auf die Länge von 150 mm geschnitten. Probekörper, welche für die verformungsgesteuerten Versuche vorgesehen waren (Relaxationsversuche) wurden in einer Drehbank mit einer Kerbe versehen (vgl. Bild 1). Im Anschluß daran wurden die für die Dauerstandsversuche vorgesehenen Proben präpariert; dazu gehörte

- Bekleben mit den Lastplatten
- Kleben der Dehnungsmeßstreifen
- Anbringen der Versiegelung

Alle Körper wurden anschließend in den Klimaraum gebracht und dort bis zum Belastungsbeginn bzw. zur Durchführung der Relaxationsversuche aufbewahrt.

In Bild 2 ist der Zeitpunkt der Entnahme der 100-mm- \varnothing -Bohrkerne aus den 30-cm-Würfeln angegeben.

4.2.3 Klebemittel

Als Klebemittel zur Verbindung der Lasteinleitungsplatten mit den Probekörpern kam Polymethylmethacrylat zur Anwendung (PMMA). Die Auswahl dieses Klebemittels erfolgte aufgrund eigener Vorversuche, da kein Hersteller gefunden werden konnte, der Angaben zur Dauerstandsfestigkeit des Klebemittels geben konnte oder wollte.

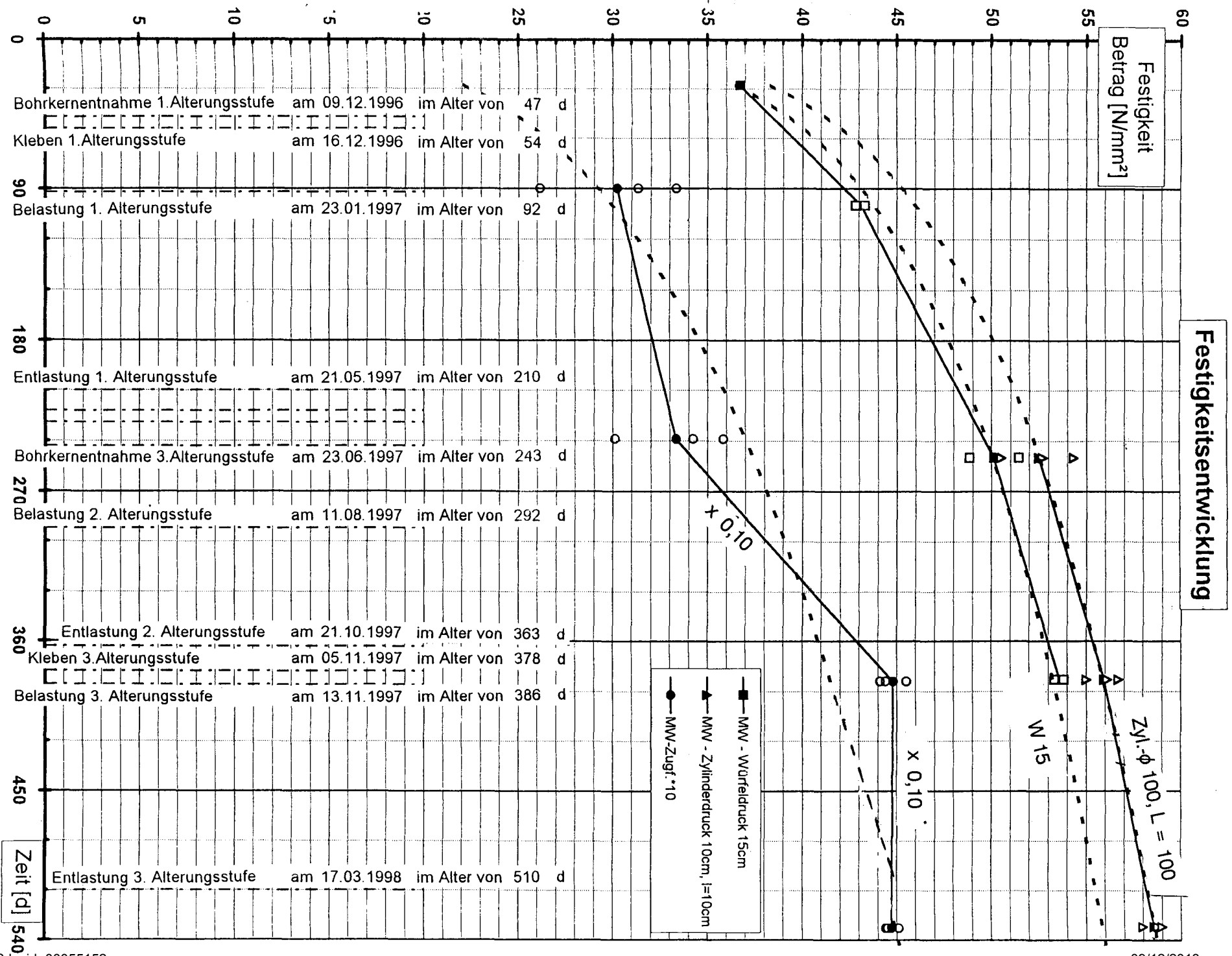


Bild 2: Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeit

4.2.4 Versiegelung

Die Versiegelung der Proben erfolgte durch Umwickeln mit einer Folie, die mit Fensterauschnitten versehen werden mußte, um die Dehnungsmeßstreifen ankleben zu können, weil die Überdeckung der Dehnmeßstreifen mit der hier gewählten Folie die Meßergebnisse ungünstig zu beeinflussen schien.

Nach mehreren Versuchen wurde schließlich als Versiegelung die ALUJET-PE-Dampfbremsfolie 250 mg, blau, eingesetzt. Dieses Material hat ein amtliches Prüfzeugnis. Es besitzt eine mittlere Dicke von 0,27 mm und eine Diffusionswiderstandszahl $\mu = 455\,500$. Zum Abkleben der Stücke wurde ALUJET-Super-PE-Klebeband eingesetzt. Es zeigte sich jedoch, daß die Austrocknung der versiegelten Prüfkörper durch diese Abdichtungsmaßnahme nicht vollständig ausgeschaltet werden konnte. Ursachen hierfür könnten Undichtigkeiten in der Folienabdeckung sein, zumal für die Aufbringung der Dehnmeßstreifen „Fenster“ in der Folie freigehalten werden mußten und der Anschluß der Folie an die Lasteintragsplatten nicht unbedingt dauernd luftdicht gestaltet werden konnte.

4.3 Ergebnisse der Kurzzeit-Festigkeitsversuche

Das Ergebnis der Druckversuche sowie der Zugversuche ist auf Bild 2 dargestellt. Messungen des Elastizitätsmoduls auf Zug und Messungen der Eigenfeuchte wurden vorgenommen; es ergab sich:

E-Modul auf Zug i. M. 28.000 N/mm²

Eigenfeuchte der Bohrkern e nach dem Herausbohren: i. M. ≤ 6 Gew.-%.

Würfel druckprüfungen (150 cm x 150 cm x 150 cm) – siehe auch Bild 2

Prüfalter	mittlere Bruchspannung - [N/mm ²]
28 Tage	36,7
3 Monate	43,1
8 Monate	50,1
13 Monate	53,1

Zylinderdruckversuche (Ø 100 x 100 mm)

Prüfalter	mittlere Bruchspannung - [N/mm ²]
8 Monate	52,30
13 Monate	55,93
16 Monate	~ 56,0

Kurzzeit-Zugfestigkeiten unter mittiger Belastung (Ø 100/L = 150 mm)

Prüfalter	mittlere Bruchspannung - [N/mm ²]
3 Monate	3,02
8 Monate	3,33
13 Monate	4,48
17 Monate	4,47

4.4 Schwindmessungen und Gewichtsveränderungen

Je Altersstufe wurden 2 unversiegelte und 2 versiegelte Schwindkörper gemessen; die Ergebnisse sind aus Bild 3 zu entnehmen.

Die Aufzeichnung der Gewichtsveränderung unbelasteter Vergleichskörper mit gleicher Um-

gebungsgeschichte sollte Rückschlüsse auf die Entwicklung des inneren Feuchtigkeitszustandes der Versuchskörper im Dauerstandsversuch ermöglichen. Die Präparation der Vergleichskörper entsprach denen der Kriech- und Schwindkörper.

Da, wie beschrieben, sämtliche Versuchskörper aus einem Beton der gleichen Lieferung und Betonage entstammen, jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten mittels Bohr- und Schneidtechnik gewonnen wurden, ist somit eine geschlossene Darstellung der Gewichtsänderung über den gesamten Untersuchungszeitraum nicht sinnvoll. Der Verlauf der Trocknung ist an den folgenden Darstellungen gut nachvollziehbar. Besonders erfreulich ist die gute Übereinstimmung der Körper mit identischen Umgebungsbedingungen, so daß davon ausgegangen werden kann, daß sich der Trocknungsverlauf der in den Dauerständen eingebauten Proben adäquat einstellt.

Die Ergebnisse sind aus Bild 4 zu entnehmen.

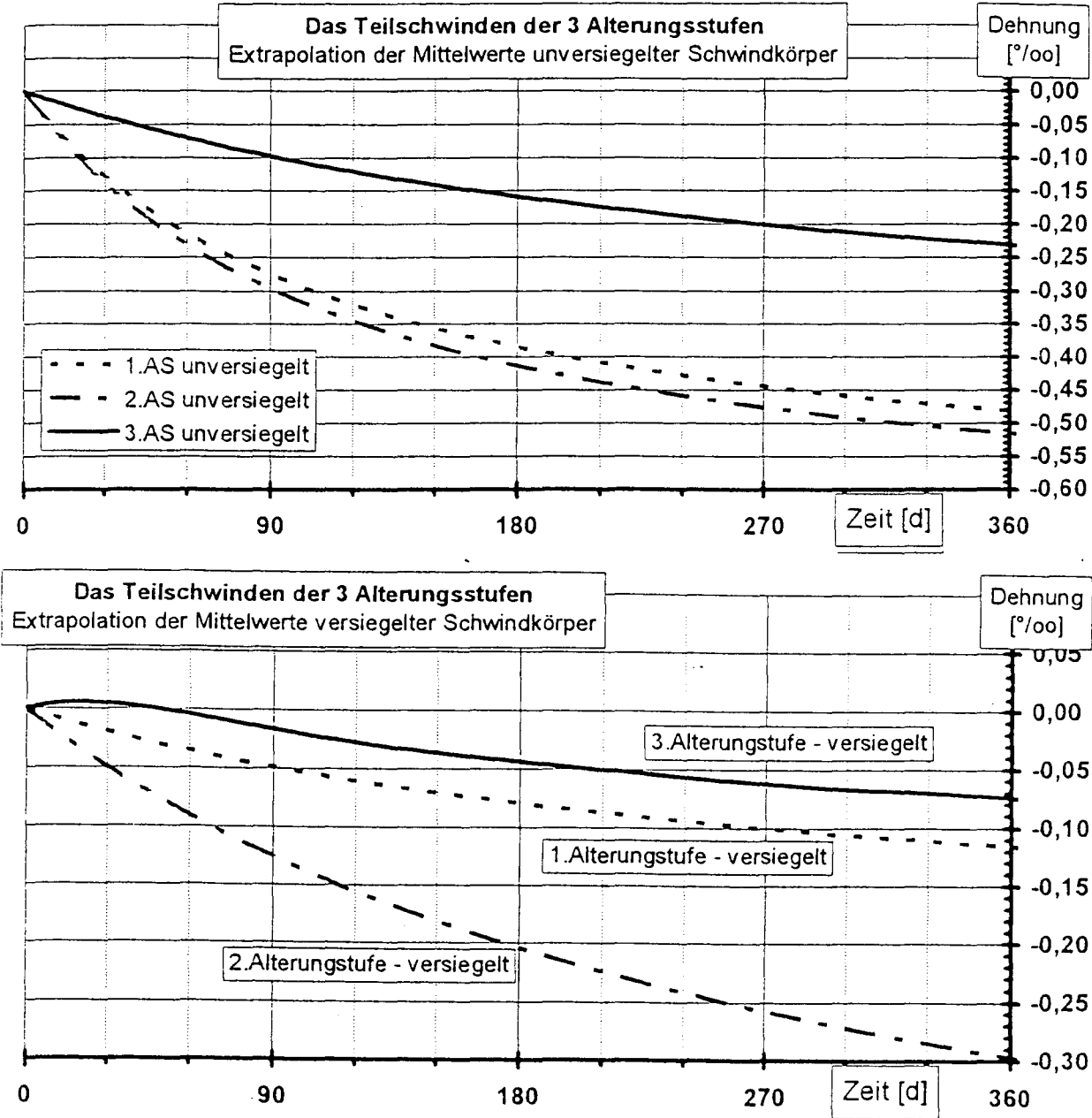


Bild 3: Gegenüberstellung des Teilschwindens der 3 Alterungsstufen

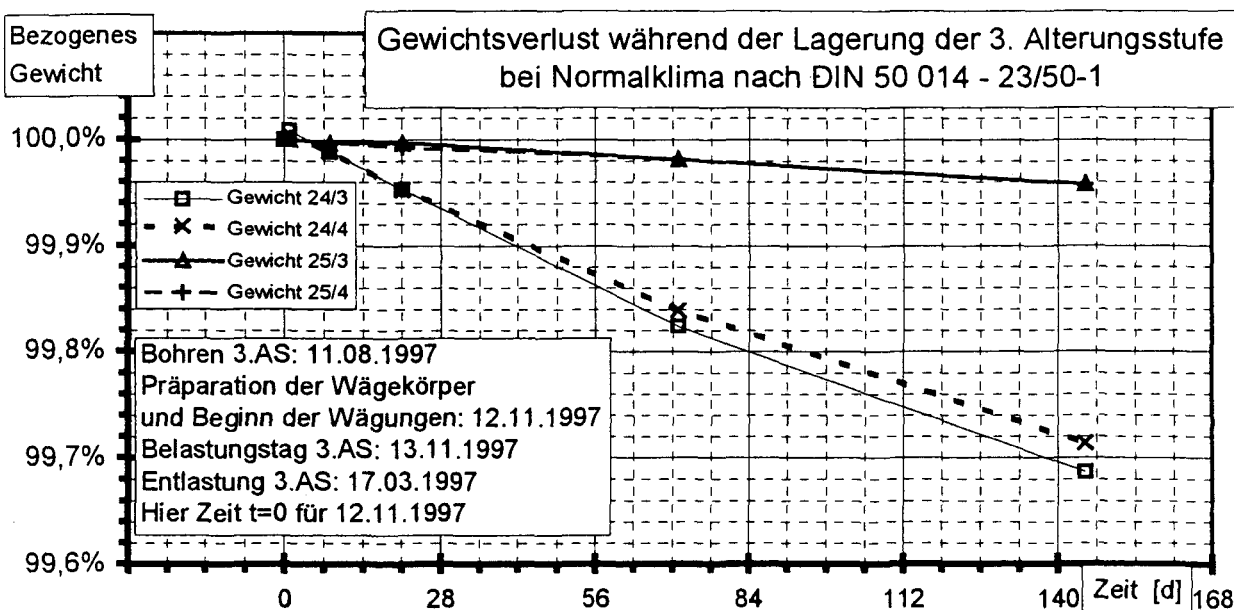
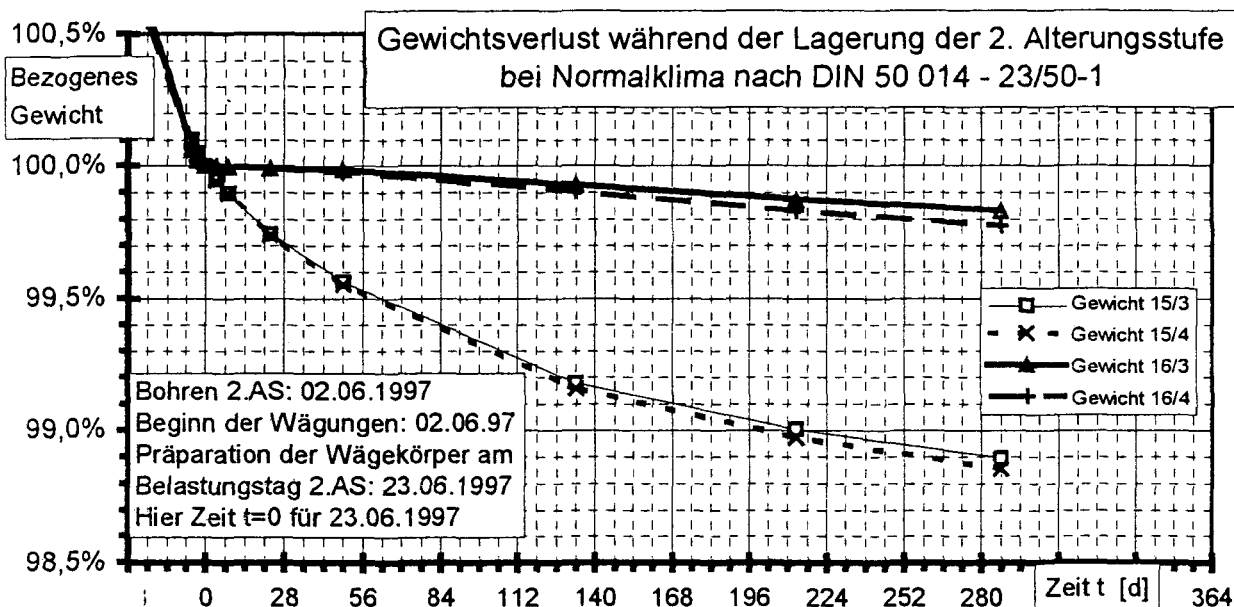
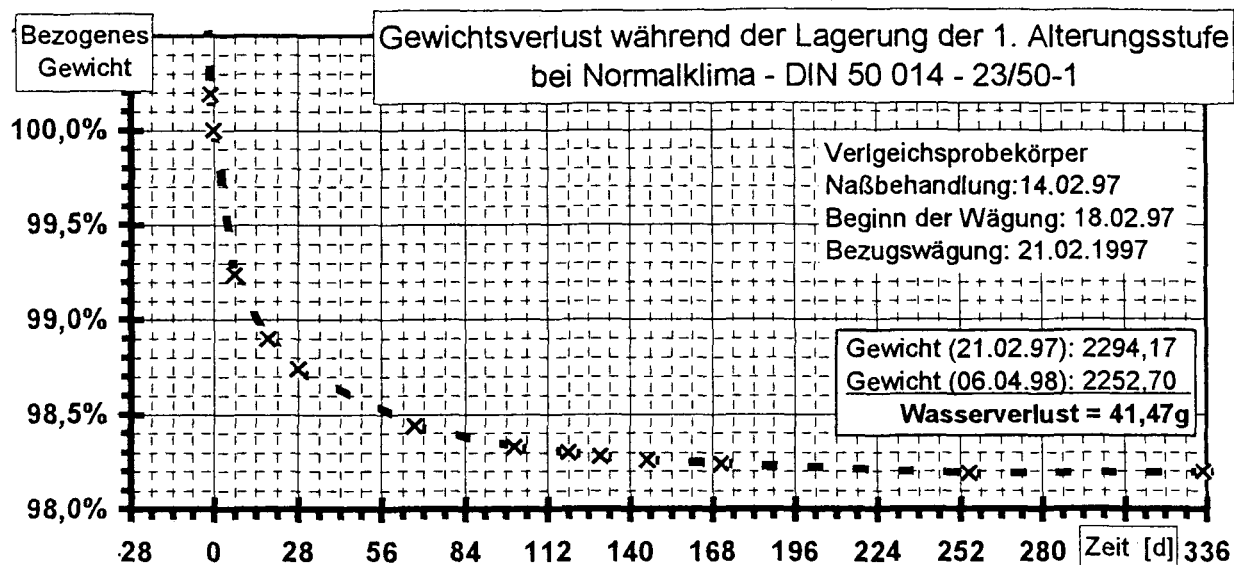


Bild 4: Gewichtsverlust von Vergleichskörpern zu den drei Altersstufen

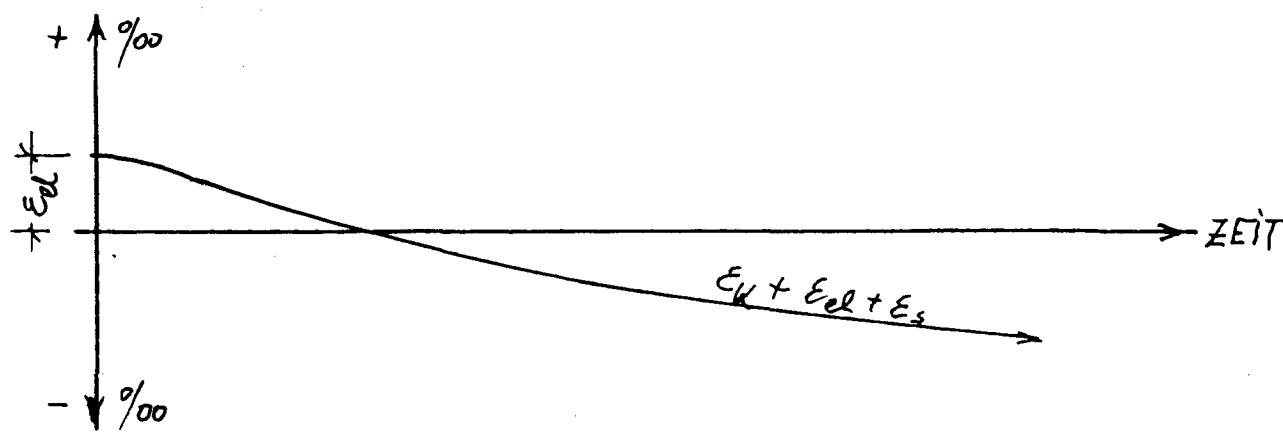
5 Ergebnisse der Zugkriech- und Schwindmessungen

5.1 Übersicht

Wie bereits unter 3.1 dargestellt, ergeben sich die Zugkriechwerte ϵ_K aus dem Ansatz

$$\epsilon_K = \epsilon_{ges} - \epsilon_{el} + \epsilon_s \quad \text{bzw.} \quad \epsilon_K + \epsilon_{el} = \epsilon_{ges} + \epsilon_s.$$

Bei Zugkriechversuchen sind somit die Gesamtverformungen ϵ_{ges} der Kriechkörper um die sofort eintretenden elastischen Verformungen ϵ_{el} zu vermindern und mit den Schwindverformungen ϵ_s zu vergrößern, um zu den Kriechverformungen ϵ_K zu gelangen. Da die Zugkriechkörper während der Belastungsdauer auch schwinden, zeigt $\epsilon_K + \epsilon_{el}$ etwa folgenden Verlauf:



In Verbindung mit ϵ_s ergibt sich:

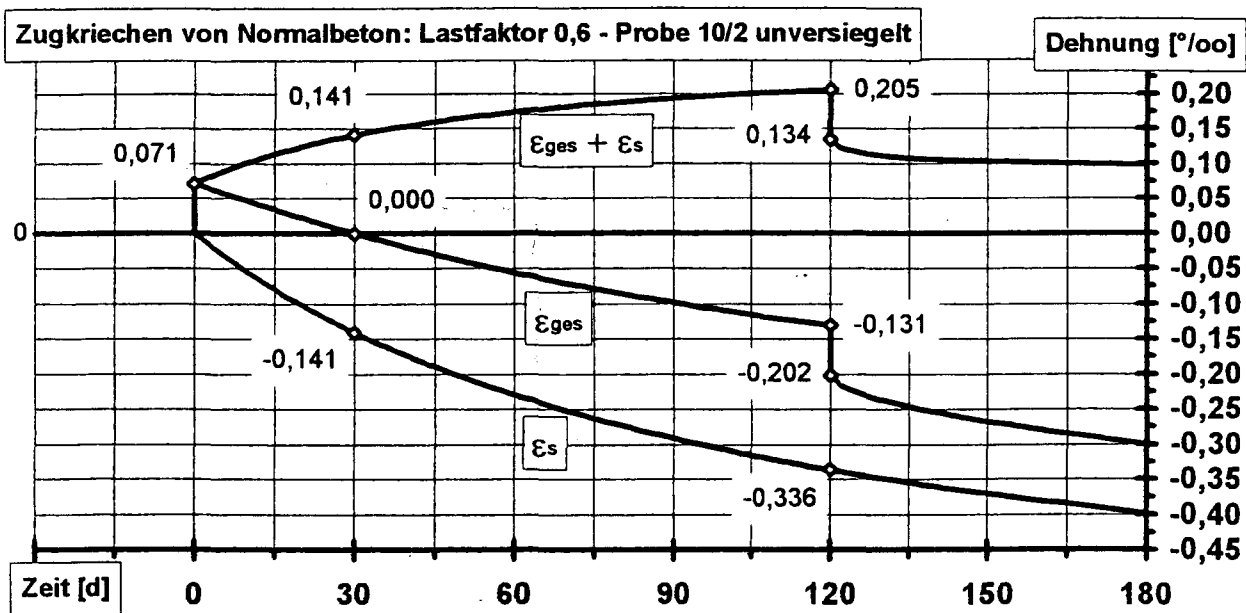


Bild 5: Gegenseitige Zuordnung der Werte $\epsilon_{ges} = (\epsilon_K + \epsilon_{el})$; Beispiel: Alterungsstufe 2, (243 d)
Probe 10/2, unversiegelt, $\sigma_K = 2,00 \text{ N/mm}^2$, Anlage A 7

Die im vorliegenden Meßverfahren gewählte elektronische Verbindung der Meßwerte der belasteten mit jenen der unbelasteten Körper führt dazu, daß die Meßwerte $\epsilon_{ges} = \epsilon_{el} + \epsilon_K$ nicht unmittelbar erfaßt werden können; vielmehr erscheint sofort die Summe aus

$$(\epsilon_K + \epsilon_{el}) + \epsilon_s = \epsilon_{ges} + \epsilon_s$$

als Ergebnis der Zugkriechversuche. Da die Schwindverformungen der Kriechkörper größer waren als $(\epsilon_K + \epsilon_{el}) = \epsilon_{ges}$, gerieten die Werte ϵ_{ges} in den negativen Bereich, wie Bild 5 zeigt.

Die folgende Tabelle nennt die wichtigsten Eingangs-Versuchsdaten.

Leider ergaben sich bei der Versuchsdurchführung vergleichsweise viele verfrühte Brüche, zum Teil in der Klebefläche, überwiegend aber im Mittelbereich der Zugkörper. Einige der Versuchsabbrüche konnten zur Messung des Rückkriechens Verwendung finden.

Würfeldruckfestigkeit

Herstellung der Grundkörper
30cm x 30cm x 30cm am 23.10.1996

Alter in		Prüftag	β_{w15cm} [N/mm ²]
Tagen	Wochen		
28	4	20.11.1996	36,7
100	14	31.01.1997	43,1
250	36	30.06.1997	50,1
383	55	10.11.1997	53,6

β_{w28} nach Angabe des Herstellers

$$\beta_{w100} = (43,4 + 42,8) / 2$$

$$\beta_{w250} = (48,8 + 51,4) / 2$$

$$\beta_{w383} = (53,3 + 53,8) / 2$$

Zylinderdruckfestigkeit

Herstellung der Grundkörper
30cm x 30cm x 30cm am 23.10.1996

Alter in		Prüftag	β_{c10cm} [N/mm ²]
Tagen	Wochen		
250	36	30.06.1997	52,5
383	55	10.11.1997	55,93
532	76	08.04.1998	51,83

$$\beta_{c250} = (50,5 + 52,7 + 54,3) / 3 \text{ an } \varnothing 9,95; 1:1$$

$$\beta_{c383} = (56,1 + 56,7 + 55,0) / 3 \text{ an } \varnothing 9,95; 1:1$$

$$\beta_{c532} = (52,0 + 52,2 + 51,3) / 3 \text{ an } \varnothing 9,95; 1:1,5$$

Kurzzeitzugfestigkeit

Herstellung der Grundkörper
30cm x 30cm x 30cm am 23.10.1996;
achsiale Zugversuche an $\varnothing 9,95; 1:1,5$

Alter in		Prüftag	β_{Z10cm} [N/mm ²]
Tagen	Wochen		
90	12	21.01.1997	3,02
239	34	19.06.1997	3,33
384	54	11.11.1997	4,48
533	76	09.04.1998	4,47

$$\beta_{Z90} = (2,61 + 3,33 + 3,13) / 3$$

$$\beta_{Z239} = (3,58 + 3,01 + 3,42) / 3$$

$$\beta_{Z384} = (4,55 + 4,44 + 4,41) / 3$$

$$\beta_{Z533} = (4,45 + 4,44 + 4,51) / 3$$

Belastungsalter/ Entlastungsalter - Zugkriechen

Herstellung der Grundkörper
30cm x 30cm x 30cm am 23.10.1996

Serien (Alterungsstufe)	Tag der		Kriechzeit [d]
	Belastung	Entlastung	
1.	23.01.1997	21.05.1997	118
2.	23.06.1997	21.10.1997	120
3.	13.11.1997	17.03.1998	124

Druckelastizitätsmodul im Alter von 532 Tagen

Herstellung der Grundkörper am 23.10.1996;

Versuchstag 08.04.1998;

Belastungsgeschwindigkeit 0,05 N/(mm² s);

Bezugsfestigkeit ermittelt an Probekörper 16/2 (Ø9,95;1:1,5) mit 52,0 N/mm² ;

Dehnungsmessung: 2 induktive Wegaufnehmer längs mit Meßlänge von 50 mm (mittleres Drittel der Probe);

Bohrkern- entnahme	1. Belastung <15%	2. Belastung <20%	3. Belastung <20%	4. Belastung <20%	Mittelwert
02.06.1997	31 709	30 048	30 668	30 869	30 824
11.08.1997	27 908	26 302	29 940	29 796	28 487

Mittelwert: 29 655 N/mm²

Zugelastizitätsmodul im Alter von 533 Tagen

Herstellung der Grundkörper am 23.10.1996;

Versuchstag 09.04.1998;

Belastungsgeschwindigkeit 0,05 N/(mm² s);

Dehnungsmessung: Mittelwert aus 3 DMS längs mit Meßlänge von 60 mm (mittleres Drittel der Probe);

Bohrkern- entnahme	Tangentenmodul	Sekantenmodul			
	Ursprung	Belastungsgrad			
		0,4	0,6	0,7	1,0 (Bruch)
02.06.1997	30 000	29 900	28 900	28 300	23 900
02.06.1997	33 100	31 100	29 900	29 200	25 200
11.08.1997	29 100	28 900	27 700	27 000	21 500
Mittelwerte:	30 733	29 967	28 833	28 167	23 533

5.2 Ergebnisse der Kriech- und Schwindmessungen

Die gemessenen Zugkriechwerte

$$\varepsilon_{el} + \varepsilon_K$$

wurden getrennt nach Altersstufen, Kriechspannung sowie nach Versiegelung (Lagerungsbedingung) zusammengestellt. Offensichtlich fehlerhafte Messungen wurden weggelassen. Es verblieben 20 Kriechkurven (Anlagen A 1 bis A 20)...

Kurzzeitig ausgefallene und unmittelbar wiederbelastete Versuche wurden nicht als obsolet angesehen, wie z.B. Versuch 9/1, Belastungsalter 2, versiegelt, $\sigma_K = 3,33 \text{ n/mm}^2$.

Die elastischen Verformungen ε_{el} wurden einheitlich mit dem mittleren Zug-Elastizitätsmodul $E_z = 28.000 \text{ N/mm}^2$ ermittelt.

Abschließend werden die gemittelten Schwindwerte, ebenfalls getrennt nach Altersstufen und Lagerungsbedingungen, wiedergegeben (A 21). Die dargestellten Schwindverläufe entsprechen Bild 3 in Abschnitt 4.4.

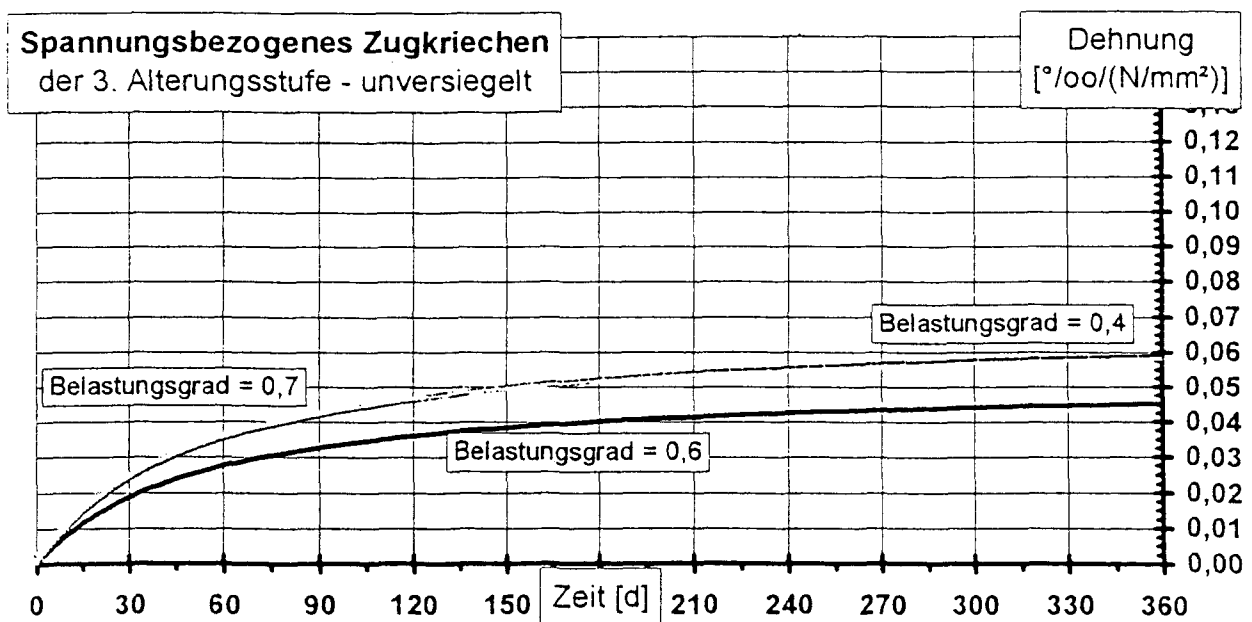
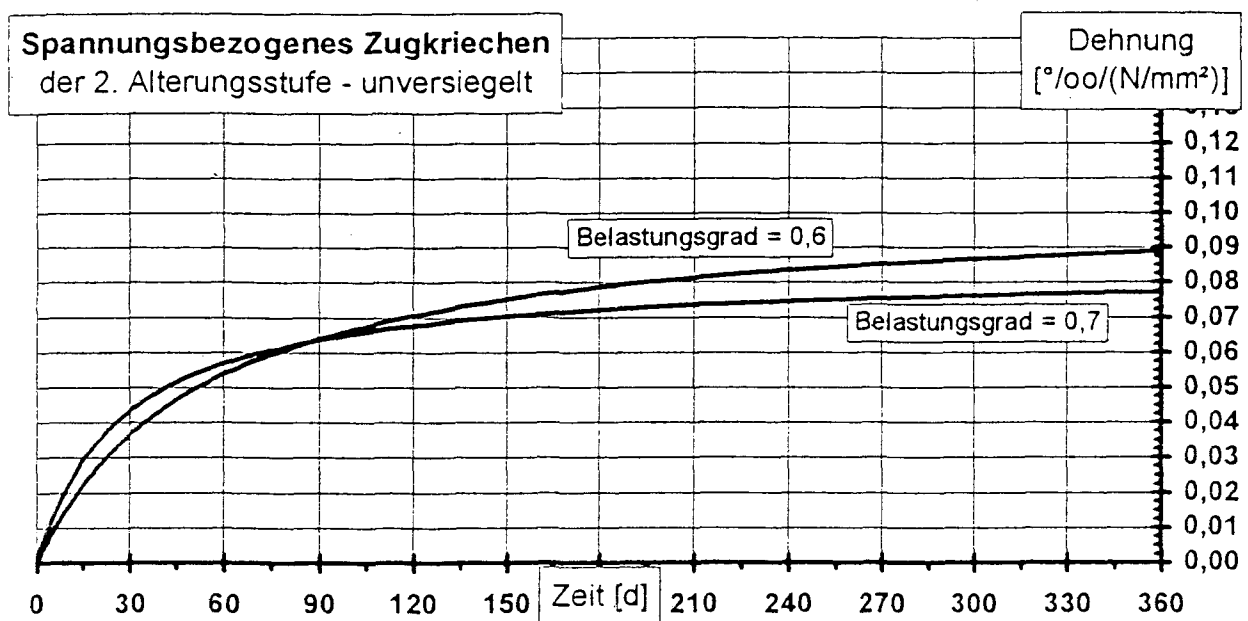
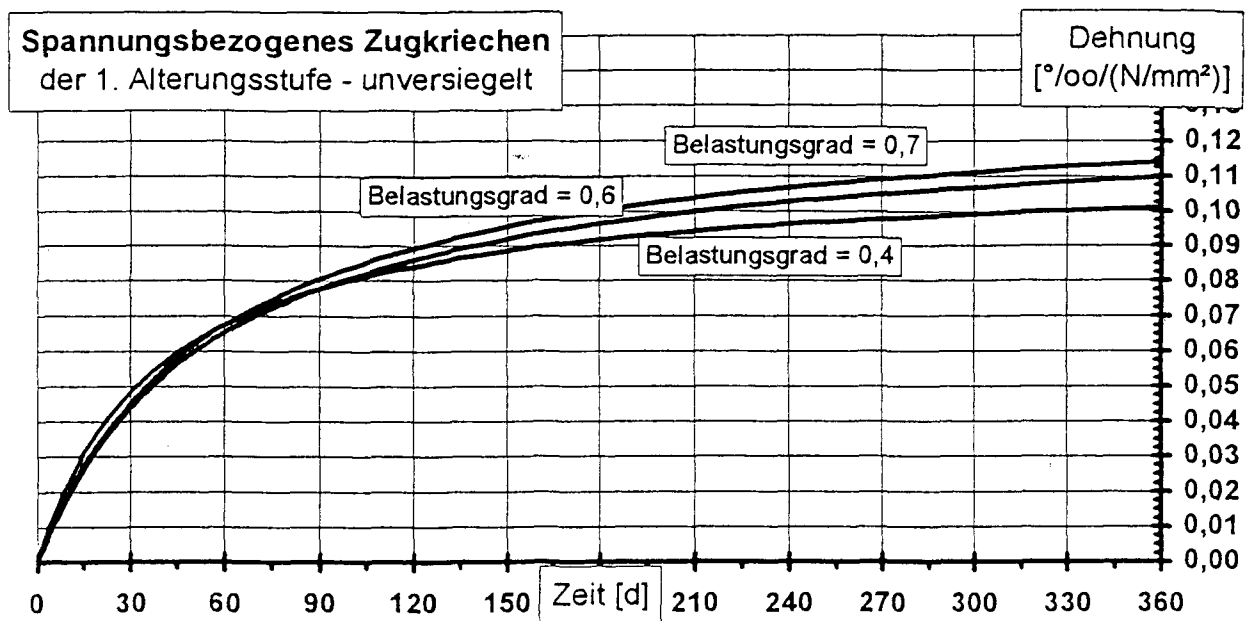
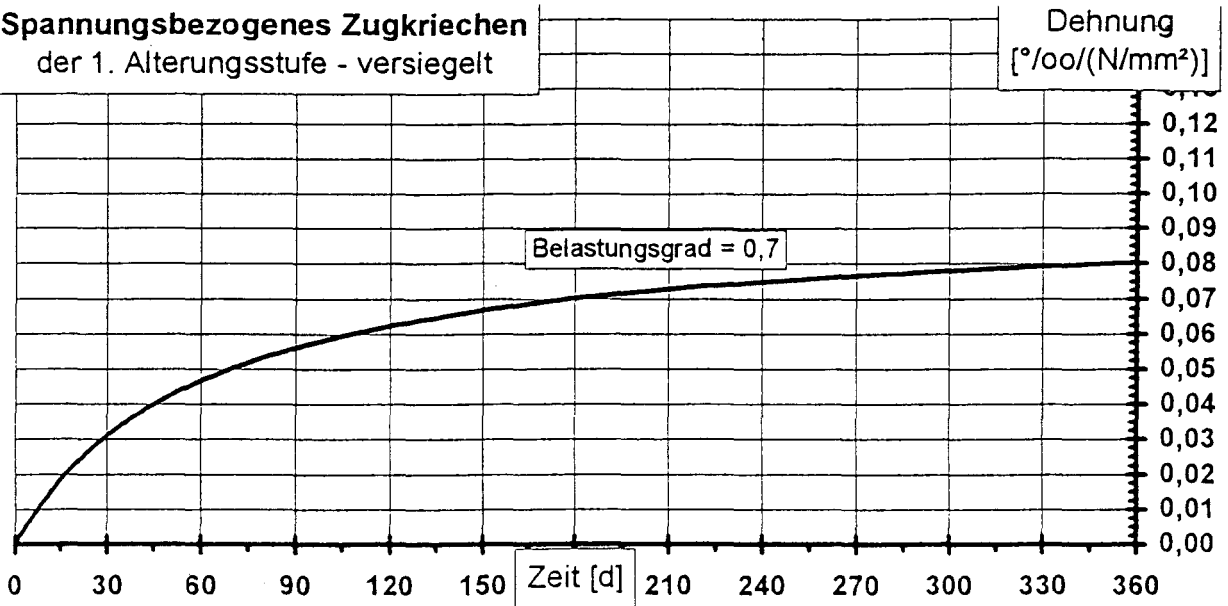
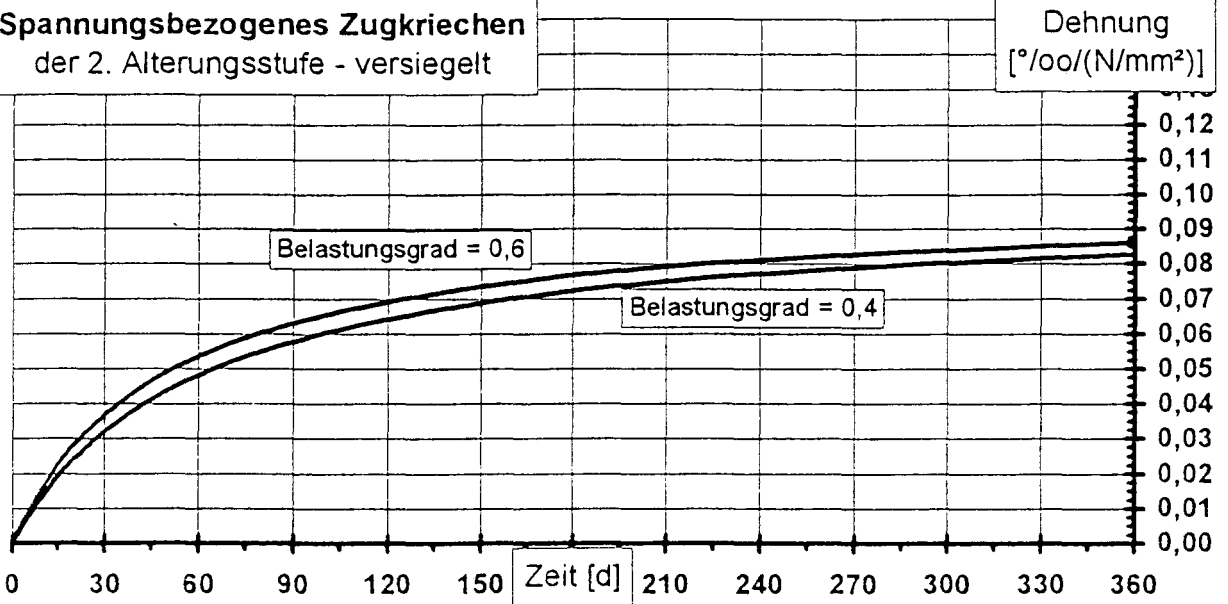


Bild 6: Approximation und Extrapolation auf 360 Tage für die unversiegelten Probekörper

Spannungsbezogenes Zugkriechen
der 1. Alterungsstufe - versiegelt



Spannungsbezogenes Zugkriechen
der 2. Alterungsstufe - versiegelt



Spannungsbezogenes Zugkriechen
der 3. Alterungsstufe - versiegelt

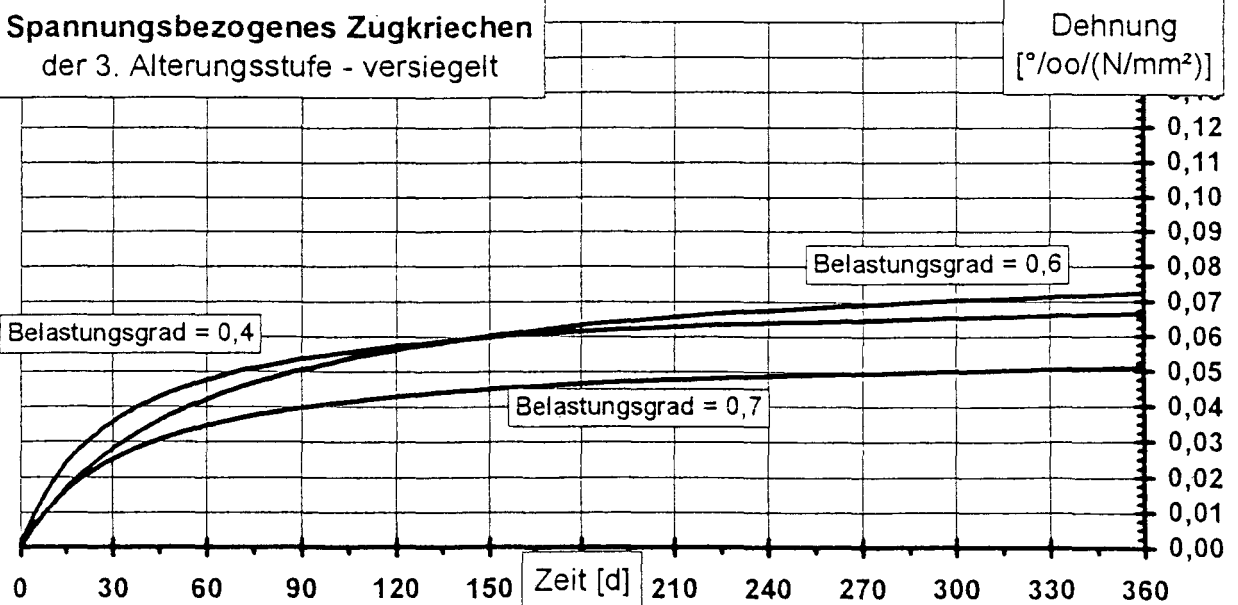


Bild 7: Approximation und Extrapolation auf 360 Tage für die 3 Altersstufen der versiegelten Probekörper

5.3 Spezifisches Zugkriechen

Wie bereits in Abschnitt 2.3 angedeutet, würden die auf 1 N/mm² bezogenen Zugkriechverformungen $\overline{\epsilon_K}$ ermittelt und nach Ross [1] auf 1 Jahr extrapoliert. Es zeigte sich, daß die gewählte Belastungsdauer von etwa 100 Tagen ausreicht, um die Kriechverformungen $\overline{\epsilon_{K,360}}$ mit hinreichender Sicherheit zu ermitteln.

Solange annähernd spannungsproportionales Kriechen vorliegt, verschwinden in dieser Darstellung die Auswirkungen der unterschiedlichen Spannungsstufen innerhalb eines Belastungsalters (Altersstufe). Diese Voraussetzung erwies sich als richtig, wie die Bilder 6 und 7 erkennen lassen. Auch bei Belastungsstufe 0,7 wurde kein überproportionales Zugkriechen beobachtet.

Die spezifischen, auf $\sigma_K = 1 \text{ N/mm}^2$ bezogenen versiegelten Kriechkurven sind weit weniger gut dokumentiert als die unversiegelten Kriechwerte. Der Grund hierfür ist in der Tatsache zu sehen, daß die Versiegelung nicht einwandfrei funktionierte und sich von Probekörper zu Probekörper unterschiedliche Schwindverformungen und damit auch unsichere Kriechverformungen einstellen mußten. Insbesondere liegt für Altersstufe 1, versiegelt, nur ein auswertbarer Kriechversuch vor, mit verkürzter Belastungsdauer von 92 Tagen gegenüber 120 Tagen, dessen Verlauf Störungen aufweist. Es ist daher zu vermuten, daß der für Altersstufe 1, versiegelt, ermittelte spezifische Kriechwert $\overline{\epsilon_{K,360}}$ zu niedrig ist.

Um einen Vergleich mit den Ergebnissen von Druckkriechversuchen etwa nach [3] zu versuchen, wurden die Werte $\overline{\epsilon_{K,360}}$ nach Altersstufen geordnet aufgetragen und auf eine Altersstufe (Belastungsalter) von 28 Tagen extrapoliert (Bild 8). Es ergaben sich für das 28-Tage-Belastungsalter

- $\overline{\epsilon_{K,360}}$ unversiegelte Kriechkörper ~ 0,123 ‰
- $\overline{\epsilon_{K,360}}$ versiegelte Kriechkörper ~ 0,095 ‰

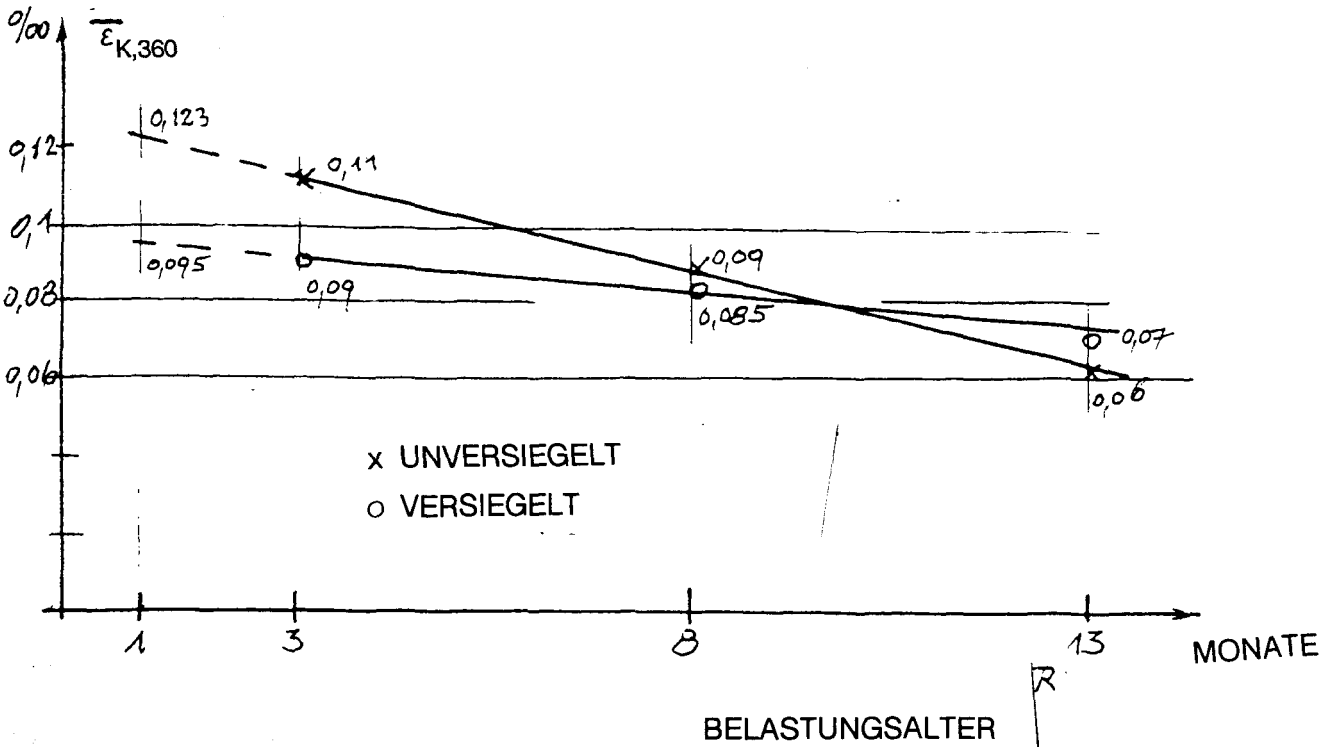


Bild 8

5.4 Kriechzahlen φ

Geht man von einer einheitlichen elastischen Verformung $\overline{\varepsilon}_{el}$ unter $\sigma_K = 1 \text{ N/mm}^2$ und $E_z = 28.000 \text{ N/mm}^2$ aus, ergibt sich $\overline{\varepsilon}_{el} = 1/28.000 = 0,0357 \text{ ‰}$ und eine Kriechzahl $\varphi = \overline{\varepsilon}_{K,360} / \overline{\varepsilon}_{el}$

in den 3 Altersstufen:

		$\varphi = \overline{\varepsilon}_{K,360} / \overline{\varepsilon}_{el}$	
		unversiegelt	versiegelt
Altersstufe 1, Belastungsalter	92 Tage	3,1	2,5
Altersstufe 2, "	243 Tage	2,3	2,4
Altersstufe 3, "	386 Tage	1,5	1,7
extrapoliert: Belastungsalter	28 Tage	3,4	2,7

Der Abfall der Kriechzahl φ mit zunehmendem Belastungsalter entspricht der „Versteifung“ des Betons – so, wie auch bei Druckkriechen beobachtet. Der Unterschied zwischen unversiegelten und versiegelten Proben ist vergleichsweise klein und deutet darauf hin, daß die Versiegelung mit einer Folie nicht voll wirksam war. Die Versuchskörper zu Altersstufe 3 wurden bereits 5 Monate vor Belastungsbeginn (vgl. Bild 2) aus den Grundkörpern herausgebohrt und im Klimaraum gelagert. Sie haben vermutlich weitestgehend eine Ausgleichsfeuchte wie die unversiegelt verbliebenen Versuchskörper erreicht, so daß die Versiegelung kaum Einfluß auf das Kriechverhalten nehmen konnte.

5.5 Rückkriechen

Kurzzeitige Entlastungen über nicht mehr als etwa 5 Tage zeigen nach Wiederbelastung gute Annäherung an den Kriechverlauf ungestörter Proben. Bild 9 zeigt den Kriechverlauf von Probe 1/2 und der gleichartigen Probe 3/2: Die erste, nur wenige Tage umfassende Entlastung von Probe 3/2 wird nahezu aufgeholt, die zweite Entlastung über etwa 30 Tage führt zu bleibend geringeren Kriechverformungen.

Systematische Messungen des Rückkriechens waren nur im Anschluß an die 3. Altersstufe möglich. Es zeigte sich: Entlastungen über 120 Tage gestatten bereits eine Extrapolation des Rückkriechens bis 360 Tage. Auf Bild 5 wurden die Zusammenhänge angedeutet: Die elastische Augenblicksverformung ε_{el} bei Beginn des Zugkriechens wird der sofort eintretenden elastischen Rückverformung $\varepsilon_{el,R}$ bei Entlastung gleichgesetzt. Die Rückkriechverformung $\varepsilon_{K,360,R}$ zeigt bei versiegelten Proben eine mit der Kriechspannung σ_K ansteigende Tendenz, ausgedrückt als Bruchteil der Kriechverformung $\varepsilon_{K,360}$ unter Last:

$$\sigma_K = 40 \%: \quad \varepsilon_{K,120,R} \cong 16 \% \text{ von } \varepsilon_{K,360}$$

$$\sigma_K = 60 \%: \quad \varepsilon_{K,120,R} \cong 10 \% \text{ von } \varepsilon_{K,360}$$

$$\sigma_K = 70 \%: \quad \varepsilon_{K,120,R} \cong 11 \% \text{ von } \varepsilon_{K,360}$$

Bei unversiegelten Proben ergab sich eine ähnliche Tendenz:

$$\sigma_K = 40 \%: \quad \varepsilon_{K,120,R} \cong 40 \%$$

$$\sigma_K = 60 \%: \quad \varepsilon_{K,120,R} \cong 34 \%$$

$$\sigma_K = 70 \%: \quad \varepsilon_{K,120,R} \cong 26 \%$$

Die Übereinstimmung zwischen versiegelten und unversiegelten Proben ist mangelhaft; angesichts der geringen Probenzahl wurden vermutlich einzelne fehlerbehaftete Ergebnisse mit berücksichtigt.

Die sog. verzögert elastischen Verformungen konnten hier mangels detaillierter Meßwerte nicht erfaßt werden und wurden den Rückkriech-Verformungen zugeschlagen.

Auf Bild 10 wurde der Versuch gemacht, die Rückkriechverformungen auf die jeweils vorhergegangenen Kriechspannungen σ_K zu beziehen und solcherart zu spannungsbezogenen Darstellungen zu gelangen. Es zeigt sich eine bemerkenswerte Unabhängigkeit der Rückkriechverformungen von den vorher gewählten Spannungsstufen.

Die einzelnen Meßergebnisse sind im Anhang unter A 22 bis A 25 zu finden.

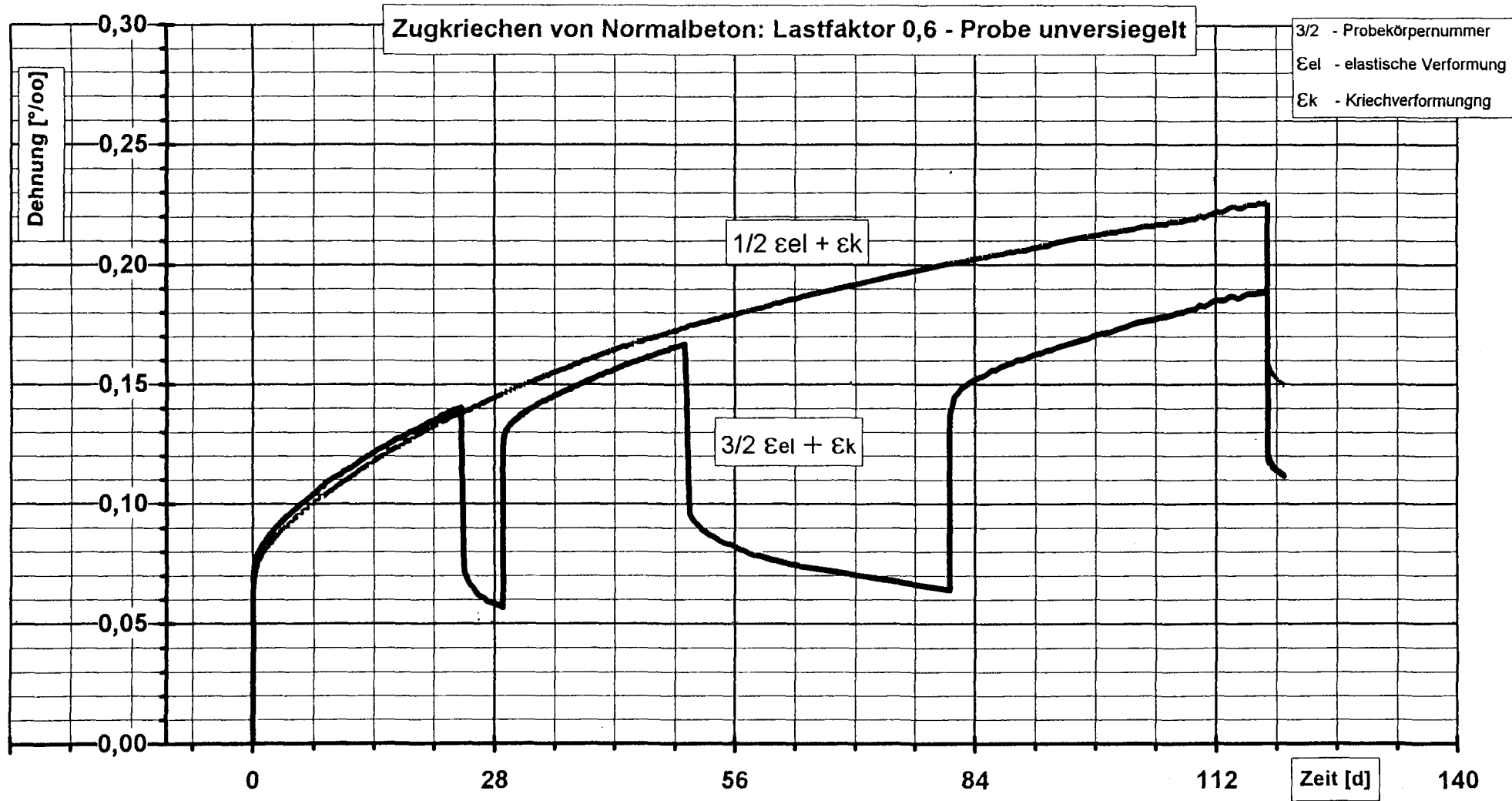


Bild 9

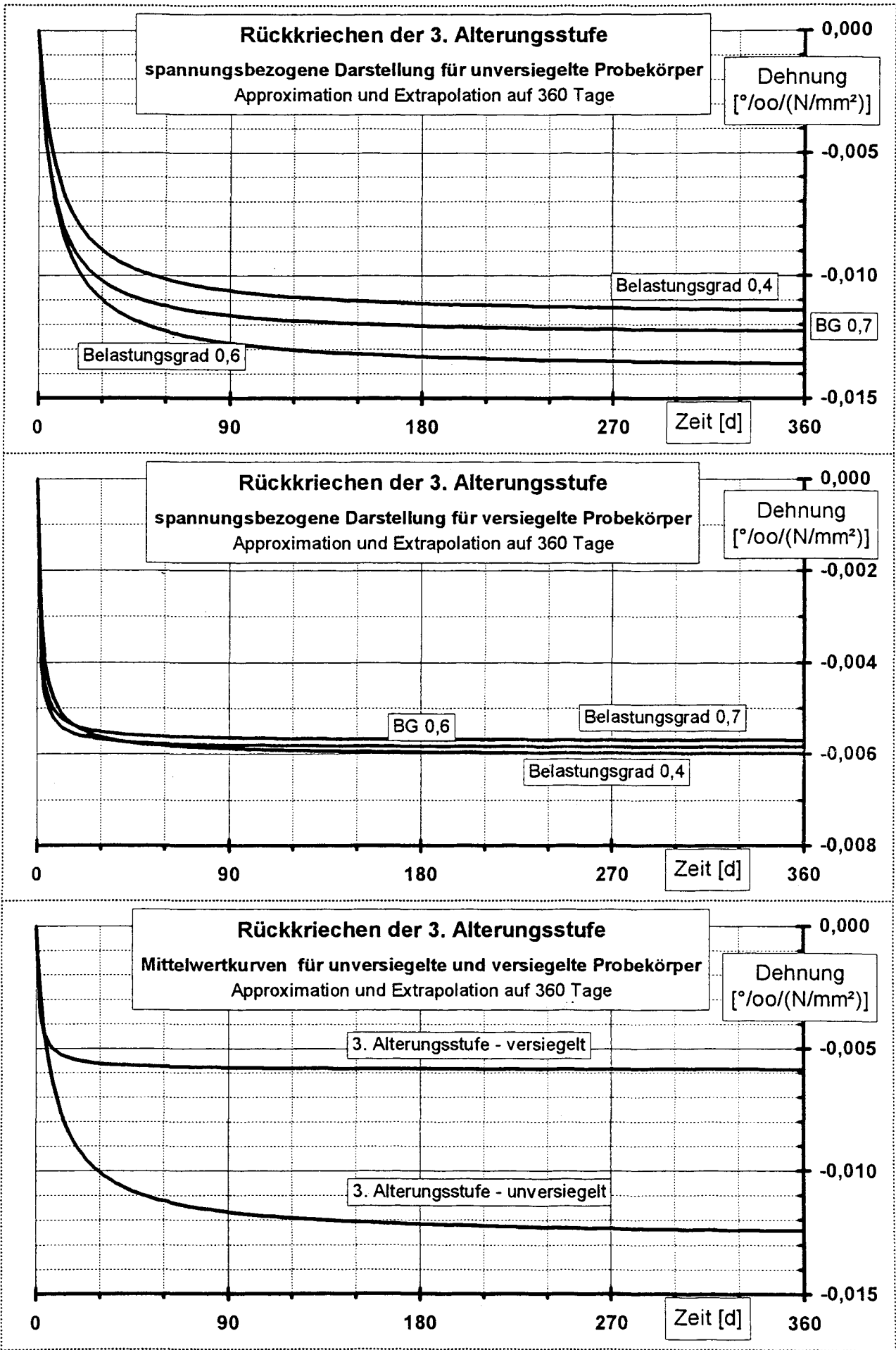


Bild 10

Herstellung der Grundkörper (30cm x 30cm x 30cm) am 23.10.1996

1. Alterungsstufe	Belastungs- grad	σ_k [N/mm ²]	ε_{el} [o/oo]	unversiegelt					versiegelt				
Bohrkernentnahme: 09.12.1996				$\varepsilon_{k,360}$	$\bar{\varepsilon}_{el}$	$\bar{\varepsilon}_{k,360}$	φ	$\varepsilon_{s,360}$	$\varepsilon_{k,360}$	$\bar{\varepsilon}_{el}$	$\bar{\varepsilon}_{k,360}$	φ	$\varepsilon_{s,360}$
Belastungsbeginn: 13.01.1997 mittl. Zugfestigkeit: 3,02 N/mm ² mittl. Druckfestigk.: 43,1 N/mm ²				[o/oo]	°/oo N/mm ²	°/oo N/mm ²		[o/oo]	[o/oo]	°/oo N/mm ²	°/oo N/mm ²		[o/oo] o/oo
Belastungsalter: 92 Tage	0,4	1,21	0,043	0,122	0,0357	0,101	2,8	0,483	0,109	0,0357	0,090	2,5	0,117
Belastungsdauer: 118 Tage	0,6	1,81	0,065	0,197	0,0357	0,109	3,1	0,483	-----	0,0357	-----	-----	0,117
	0,7	2,11	0,075	0,241	0,0357	0,114	3,2	0,483	0,169	0,0357	0,080	2,3	0,117
φ im Mittel:							3,1	φ im Mittel:					2,5

2. Alterungsstufe	Belastungs- grad	σ_k [N/mm ²]	ε_{el} [o/oo]	unversiegelt					versiegelt				
Bohrkernentnahme: 02.06.1997				$\varepsilon_{k,360}$	$\bar{\varepsilon}_{el}$	$\bar{\varepsilon}_{k,360}$	φ	$\varepsilon_{s,360}$	$\varepsilon_{k,360}$	$\bar{\varepsilon}_{el}$	$\bar{\varepsilon}_{k,360}$	φ	$\varepsilon_{s,360}$
Belastungsbeginn: 23.06.1997 mittl. Zugfestigkeit: 3,33 N/mm ² mittl. Druckfestigk.: 50,1 N/mm ²				[o/oo]	°/oo N/mm ²	°/oo N/mm ²		[o/oo]	[o/oo]	°/oo N/mm ²	°/oo N/mm ²		[o/oo] o/oo
Belastungsalter: 243 Tage	0,4	1,34	0,048	-----	0,0357	-----	-----	0,517	0,111	0,0357	0,083	2,3	0,299
Belastungsdauer: 120 Tage	0,6	2,00	0,071	0,178	0,0357	0,089	2,5	0,517	0,172	0,0357	0,086	2,4	0,299
	0,7	2,34	0,084	0,180	0,0357	0,077	2,2	0,517	-----	0,0357	-----	-----	0,299
φ im Mittel:							2,3	φ im Mittel:					2,4

3. Alterungsstufe	Belastungs- grad	σ_k [N/mm ²]	ε_{el} [o/oo]	unversiegelt					versiegelt				
Bohrkernentnahme: 11.08.1997				$\varepsilon_{k,360}$	$\bar{\varepsilon}_{el}$	$\bar{\varepsilon}_{k,360}$	φ	$\varepsilon_{s,360}$	$\varepsilon_{k,360}$	$\bar{\varepsilon}_{el}$	$\bar{\varepsilon}_{k,360}$	φ	$\varepsilon_{s,360}$
Belastungsbeginn: 13.11.1997 mittl. Zugfestigkeit: 4,48 N/mm ² mittl. Druckfestigk.: 53,6 N/mm ²				[o/oo]	°/oo N/mm ²	°/oo N/mm ²		[o/oo]	[o/oo]	°/oo N/mm ²	°/oo N/mm ²		[o/oo] o/oo
Belastungsalter: 386 Tage	0,4	1,79	0,064	0,104	0,0357	0,058	1,6	0,233	0,107	0,0357	0,066	1,8	0,010
Belastungsdauer: 124 Tage	0,6	2,69	0,096	0,121	0,0357	0,045	1,3	0,233	0,194	0,0357	0,072	2,0	0,010
	0,7	3,14	0,112	0,182	0,0357	0,058	1,6	0,233	0,160	0,0357	0,051	1,4	0,010
φ im Mittel:							1,5	φ im Mittel:					1,7

 $\bar{\varepsilon}_{k,360}$ = spannungsbezogene Kriechverformung $\bar{\varepsilon}_k$ auf 360 d extrapoliert $\varepsilon_{s,360}$ = Schwindverformung auf 360 d extrapoliert φ = $\bar{\varepsilon}_{k,360} / \bar{\varepsilon}_{el}$ Für das Belastungsalter $t_0 = 28d$ ergeben sich bei Extrapolation gemäß Bild 8 die auf 1 N/mm² bezogenen Kriechverformungen $\bar{\varepsilon}_{k,360}(\text{unversiegelt}) = 0,123 \text{ } ^\circ/\text{oo}$ und $\bar{\varepsilon}_{k,360}(\text{versiegelt}) = 0,095 \text{ } ^\circ/\text{oo}$

6 Vergleiche mit älteren Kriechversuchen

6.1 Druckkriechen

Eine der offenen Fragen war stets, ob das Zugkriechen von Beton nach ähnlichen Gesetzmäßigkeiten abläuft wie das Druckkriechen. Die bisher hierzu veröffentlichten Ergebnisse zeigen kein einheitliches Bild.

Die vorliegenden Ergebnisse wurden mit den in [3] veröffentlichten Werten verglichen. Hierzu mußten allerdings die dort an Zylindern Ø 200 mm gewonnenen Ergebnisse auf Probekörper Ø 100 mm umgerechnet werden, was mit Hilfe der in DIN 1045/4227 angegebenen Tafeln näherungsweise gelingt:

Für das Belastungsalter 28 Tage zeigen unversiegelte Kriechzylinder Ø 100 mm nach 1 Jahr Belastungsdauer etwa 20 % größere Kriechwerte, verglichen mit Proben Ø 200 mm gleichen Belastungsalters.

In [3] werden für Probekörper Ø 200 mm aus ähnlichen Zuschlägen und mit vergleichbaren Mischungsverhältnissen – Belastungsalter 28 Tage – i. M. mit 0,09 ‰ Druck-Kriechverformung, bezogen auf 1 N/mm², angegeben. Eine Umrechnung auf Zylinder Ø 100 mm führt zu

$$0,09/0,80 = 0,11 \text{ ‰.}$$

Die Leipziger Zugkriechkörper Ø 100 mm führten für ein Belastungsalter von 28 Tagen, wie Bild 8 zeigt, zu

$$0,123 \text{ ‰,}$$

woraus in der Tendenz auf etwa gleich große Kriechverformungen unter Druck wie auch unter Zug zu schließen wäre. Angesichts der mit solchen Umrechnungen und Extrapolationen verbundenen Unsicherheiten wird von weitergehenden Schlußfolgerungen Abstand genommen.

Das Mischungsverhältnis der Betone in [3] ist im Anhang unter A 30 angegeben.

6.2 Zugkriechen

In den letzten 30 Jahren sind nur wenige Arbeiten über das Zugkriechen von Beton veröffentlicht worden, von denen nur einzelne für eine vergleichende Untersuchung geeignet erschienen.

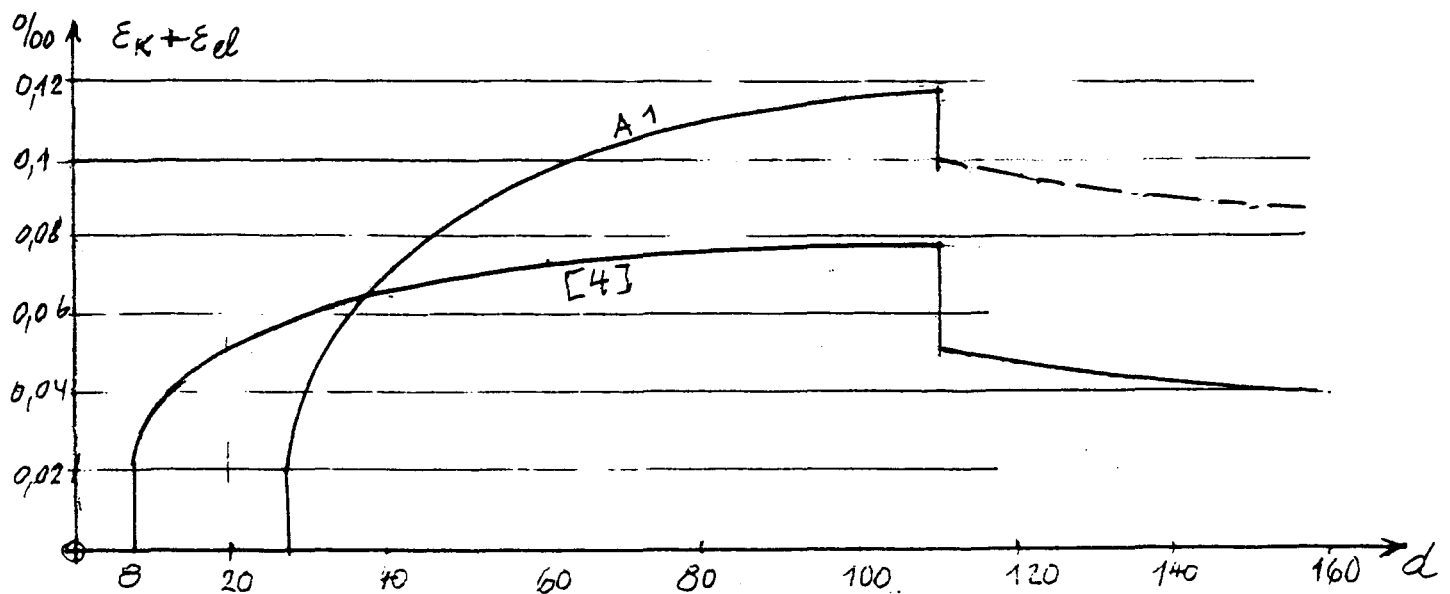
Zunächst wird der Bericht von Illston [4] aus 1965 herangezogen. Er schreibt in der „Introduction“ folgende Sätze, denen in jeder Hinsicht zuzustimmen ist:

„The experimental difficulties of testing concrete in tension are such that it is perhaps too much to hope that full agreement can be reached between the results of different workers. Thus the applied stress has to be so low (of the order of 100 to 200 lb/in²) that the strains are correspondingly tiny and are hard to measure accurately. In a drying concrete the simultaneous shrinkage may be up to 10 times as great as the tensile creep: the natural variability in shrinkage between specimens is then enough to cause very large differences in the values of creep, found by deducting the shrinkage from the strain measured under tensile stress. Further difficulties – arise in attempting to achieve a uniform distribution of stress...“

Hinzu kommen die schon bei der Untersuchung des Druckkriechens beobachteten Einflußgrößen, die eine Voraussage der Kriechverformungen höchst unsicher machen. Es sind dies vor allem:

- Menge und Art des Zements
- Wasserzementfaktor W/Z
- Klima und Klimaschwankungen
- mineralogischer Charakter der Zuschläge
- Zusatzstoffe
- Austrocknungs- und Reifezustand des Betons bei Kriechbeginn
- Abmessungen der Bauteile (Kriechversuchskörper)

Der einzige Versuch aus [4], der für eine vergleichende Untersuchung geeignet schien, wird nachfolgend dargestellt:

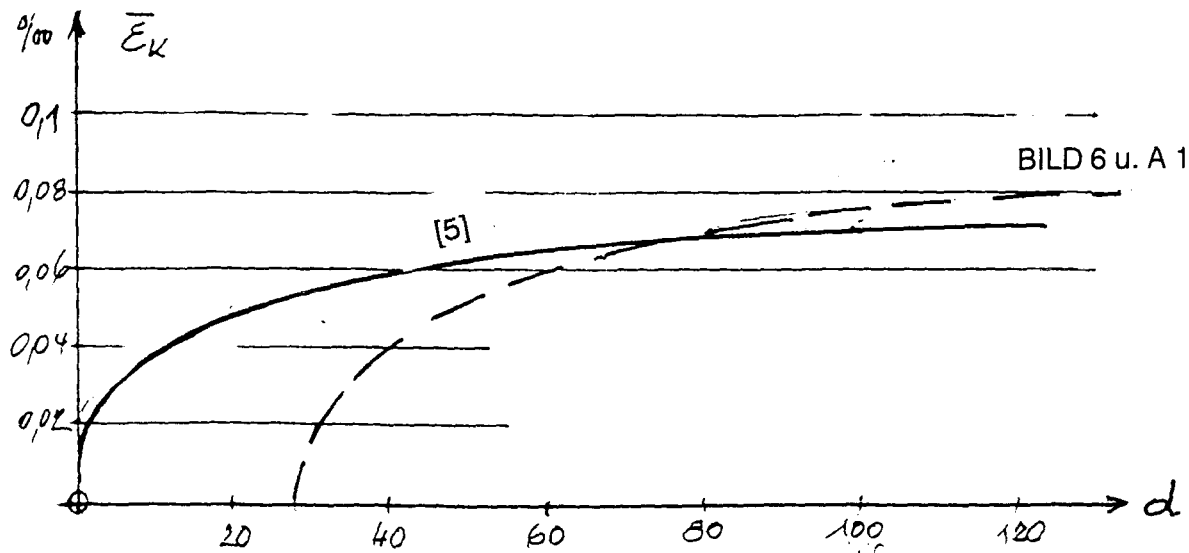


Illstone, Fig. 1:
 $\sigma_K = 0,84 \text{ N/mm}^2$
 ca. 50 % von f_{ct}
 Bel.-Alter ~ 8 d
 $\varnothing 100 \text{ mm}$

Leipzig:
 Bel.-Alter 28 d
 (extrapoliert gem. Bild 8 und
 A 1)

Bild 11: Kriechverformung nach [4]. Die Übereinstimmung ist noch befriedigend.

Ward and Cook [5] beschreiben eine Versuchsreihe mit $\sigma_K = 50 \% f_{ct}$ und 50 % rel. Feuchte über 100 d.
 Belastungsalter 7 d, \varnothing 100 mm



Leipzig:
 Bel.-Alter 28 d
 (extrapoliert gem. Bild 6)

Bild 12: Kriechverformung nach [5]. Die Übereinstimmung ist befriedigend.

Brooks [6] untersucht vergleichend Zug- und Druckkriechen einschließlich des Rückkriechens und zeigt die folgenden Meßergebnisse (1976):

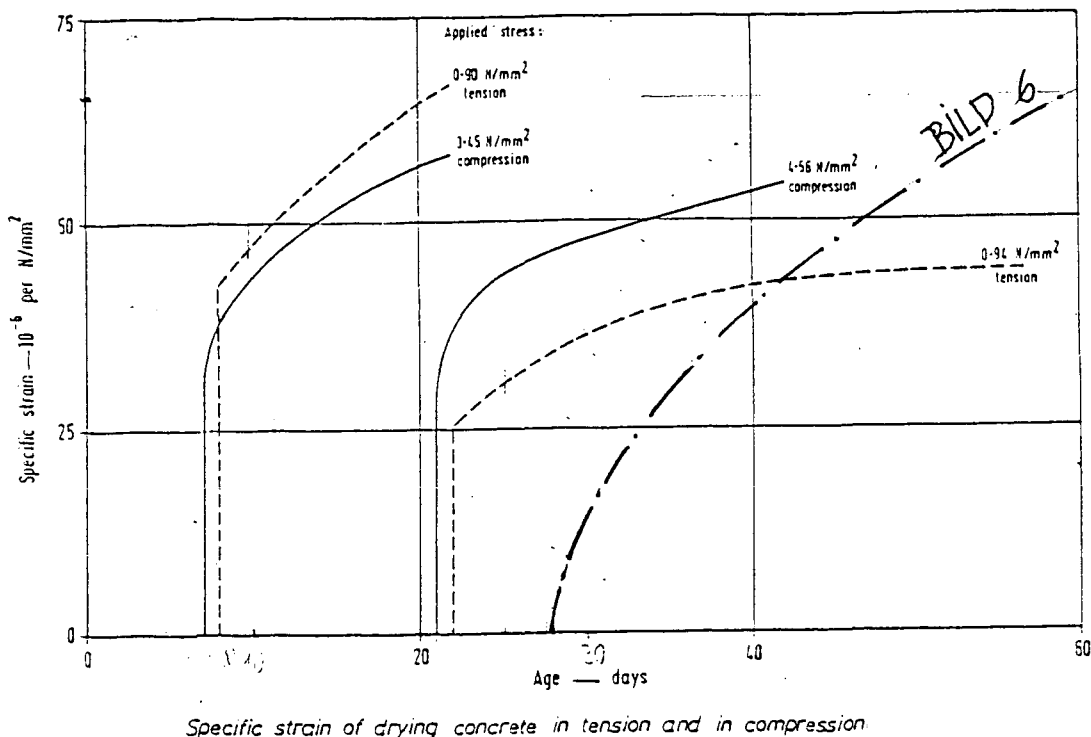


Bild 13: Kriechverformung nach [6]; Versuchsergebnisse Leipzig aus Bild 6 extrapoliert

Der Kurvenverlauf läßt erkennen, daß bei etwa 8 d Belastungsalter das Zugkriechen höhere Kriechverformungen zeigt als das Druckkriechen (es wurde auf die Einheitsspannung 1 N/mm^2 bezogen), während sich dieses Verhältnis bei einem Belastungsalter von etwa 22 d umkehrt. Dies ist auffallend und wurde bislang nicht beobachtet. Als Kriechkörper wurden Zylinder mit $\varnothing 100 \text{ mm}$ verwendet.

Auf Grund der Struktur des Betons und seiner Neigung zur Bildung von Mikrorissen schon in jungem Alter wäre zu erwarten, daß unter sonst gleichen Verhältnissen Zugkriechverformungen etwas größer ausfallen als Druckkriechverformungen. Dies schien sich im Zuge der Auswertung von Bild 8 und der vergleichenden Untersuchung mit den Ergebnissen an $\varnothing 200\text{-mm}$ -Druckzylindern auch anzudeuten (vgl. 6.1). Andererseits könnte die Entwicklung von Mikrorissen in der Gelstruktur des Zementsteins auch zu größeren Druckkriechverformungen führen. Große Unterschiede zwischen Zug- und Druckkriechverformungen sind aufgrund vorstehender Überlegungen somit nicht zu erwarten.

Wie empfindlich die Zugkriechverformungen auf vergleichsweise geringfügige Änderungen im Mischungskonzept des Betons reagieren, zeigt Bild 14, entnommen aus [5].

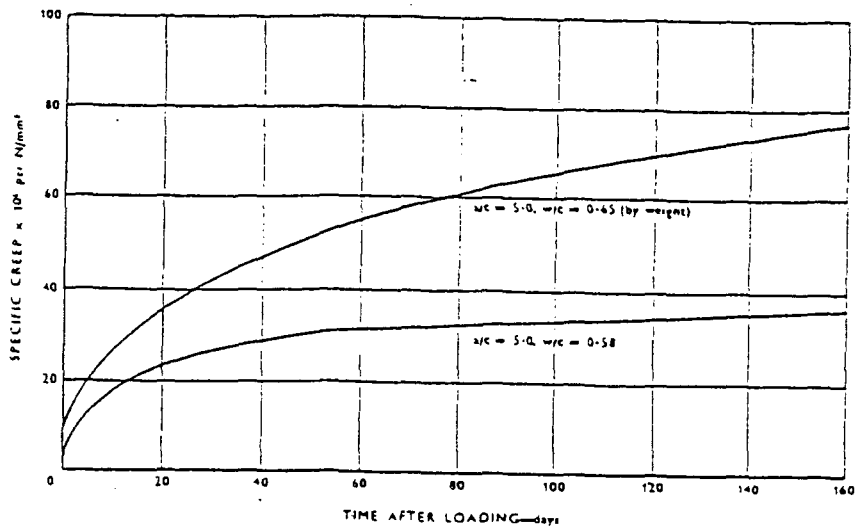


Bild 14: Spezifisches Zugkriechen bei Betonen mit $W/Z = 0,58$ bzw. $W/Z = 0,65$, Belastungsalter 21 d, Lufttrocknung

Auch die Lagerungsbedingungen während der Kriechversuche können die Ergebnisse entscheidend beeinflussen: So wird in [5] eine Meßreihe gezeigt, bei welcher die Kriechverformungen durch den Wechsel von 100 % rel. Feuchte zu 30 % r.F. annähernd verdoppelt wurden. Auch in umgekehrter Richtung ergeben sich drastische Effekte: Nach Kriechen über 30 Tage bei 50 % r.F. führt ein Wechsel zu 100 % r.F., binnen 30 weiteren Tagen zu einer etwa 4fach größeren Kriechverformung. Die Bilder 15 a und 15 b, aus [5] entnommen, zeigen diese z.T. sehr überraschenden Ergebnisse.

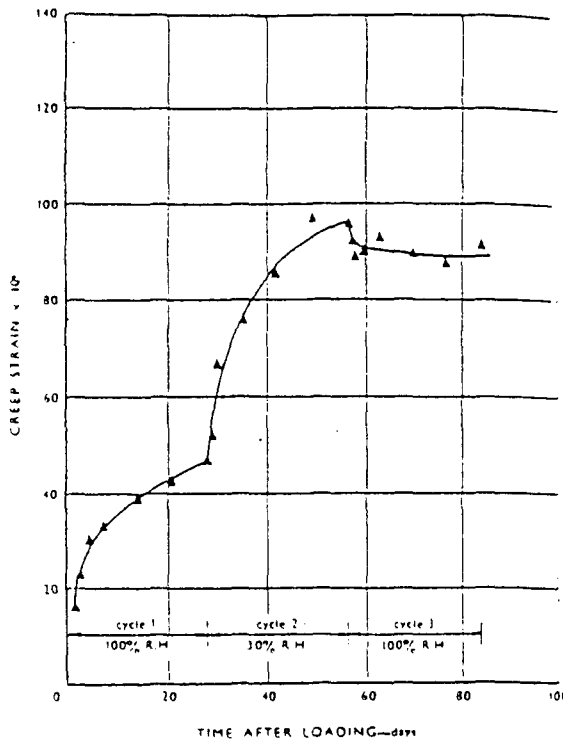


Figure 4: Tensile creep of concrete stored at varying humidities—stored wet before loading. Age at loading = 28 days; stress/strength = 0.30.

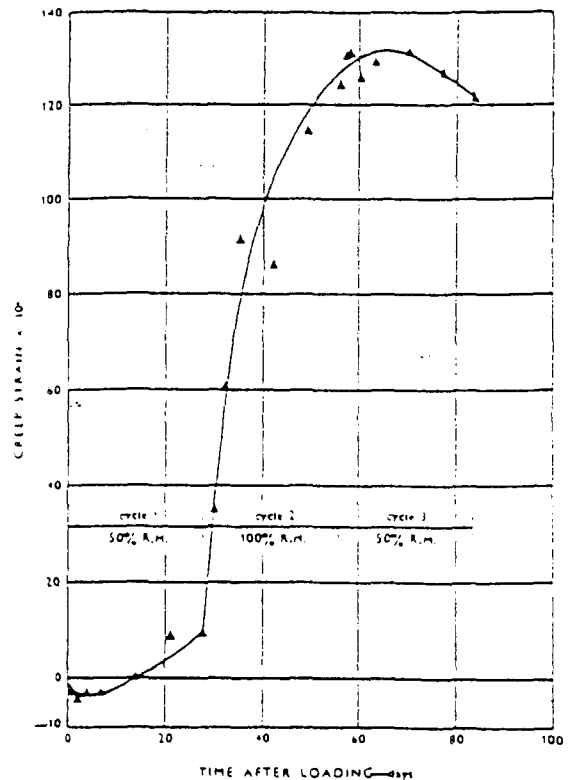


Figure 5: Tensile creep of concrete stored at varying humidities—stored dry before loading. Age at loading = 7 days; stress/strength = 0.30.

a

b

Bilder 15 a und b: Einfluß von Änderungen der relativen Feuchte auf die Zugkriechverformungen

Der Vergleich mit älteren Zugkriechversuchen zeigt deutlich, daß die in Leipzig gewonnenen Ergebnisse größere Kriechverformungen aufweisen. Dies mag am vergleichsweise hohen Zementgehalt (350 kg/m^3) und Füller (40 kg/m^3) in Verbindung mit einem Wasser-Zement-Faktor von $W/Z = 0,55$ liegen. In [4] und [5] wird ein W/Z -Wert von 0,4 genannt: Dies allein könnte die beobachteten Unterschiede der Kriechverformungen zwischen [4] und [5] und den Versuchen in Leipzig erklären.

Übereinstimmend wird berichtet, daß Kriechspannungen von $\geq 75 \%$ der Kurzzeit-Zugfestigkeit f_{ct} zu überproportionalen Kriechverformungen führen und in der Regel Dauerstandsbrüche zur Folge haben. Beobachtungen dieser Art wurden auch im Rahmen der Leipziger Versuche gemacht.

7 Relaxation

7.1 Theoretische Lösung

Als Relaxation wird die Abnahme der aufgetragenen Betonspannung $\sigma_{c,0}$ bei konstant gehaltener zugeordneter Betondehnung $\varepsilon_{c,0}$ verstanden. Bei Einführung eines Alterungsbeiwertes ρ und Vernachlässigung des Schwindens ergibt sich die Betonspannung $\sigma_{c,t}$ nach der Zeit t nach dem Ansatz

$$\sigma_{c,t}/\sigma_{c,0} = 1 - \frac{\varphi_t}{1 + \rho \cdot \varphi_t}$$

Der Alterungsbeiwert beschreibt die im höheren Betonalter kleiner werdende Kriechfähigkeit des Betons dadurch, daß die Spannungsänderung $\sigma_{c,0} - \sigma_{c,t}$ auf eine um den Faktor ρ abgeminderte Kriechzahl φ trifft. (Ansatz von Trost [7]).

Bild 16 beschreibt den Zusammenhang von ρ , φ und dem Belastungsalter:

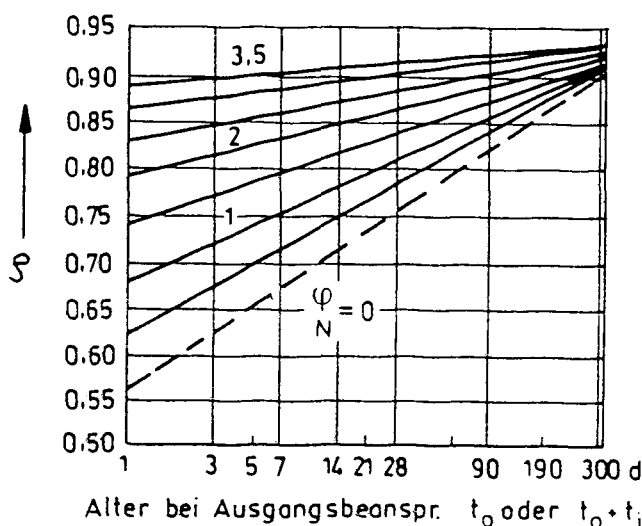


Bild 16: Alterungsbeiwert ρ in Abhängigkeit vom Belastungsalter t und der Kriechzahl φ .

Zu diesen Überlegungen wird aus Vergleichsgründen die Kriechverformung unter $\sigma_{c,0} = \text{const.}$ angegeben:

$$\varepsilon_{c,t} = \sigma_{c,0} / E_{c,0} \cdot [1 + \varphi(t, t_0)] + \varepsilon_{cs(t)}.$$

Allerdings sind diese Ausdrücke für die Relaxation und das Kriechen für Kriech-Druckspannungen abgeleitet worden.

7.2 Auswertung der Relaxationsversuche

7.2.1 Relaxation nach Überschreiten der verformungsgesteuerten Zugfestigkeit

Wie bereits in Abschnitt 2 und Bild 1 erläutert, wurden die Relaxationskörper mit einer umlaufenden Kerbe versehen, um den Meßbereich eindeutig erfassen zu können. Dies hatte jedoch eine deutliche Reduktion der Zugfestigkeit im Vergleich zu den nichtgekerbten Probekörpern zur Folge, deren Zugfestigkeit kraftgesteuert bestimmt wurde (Bild 17).

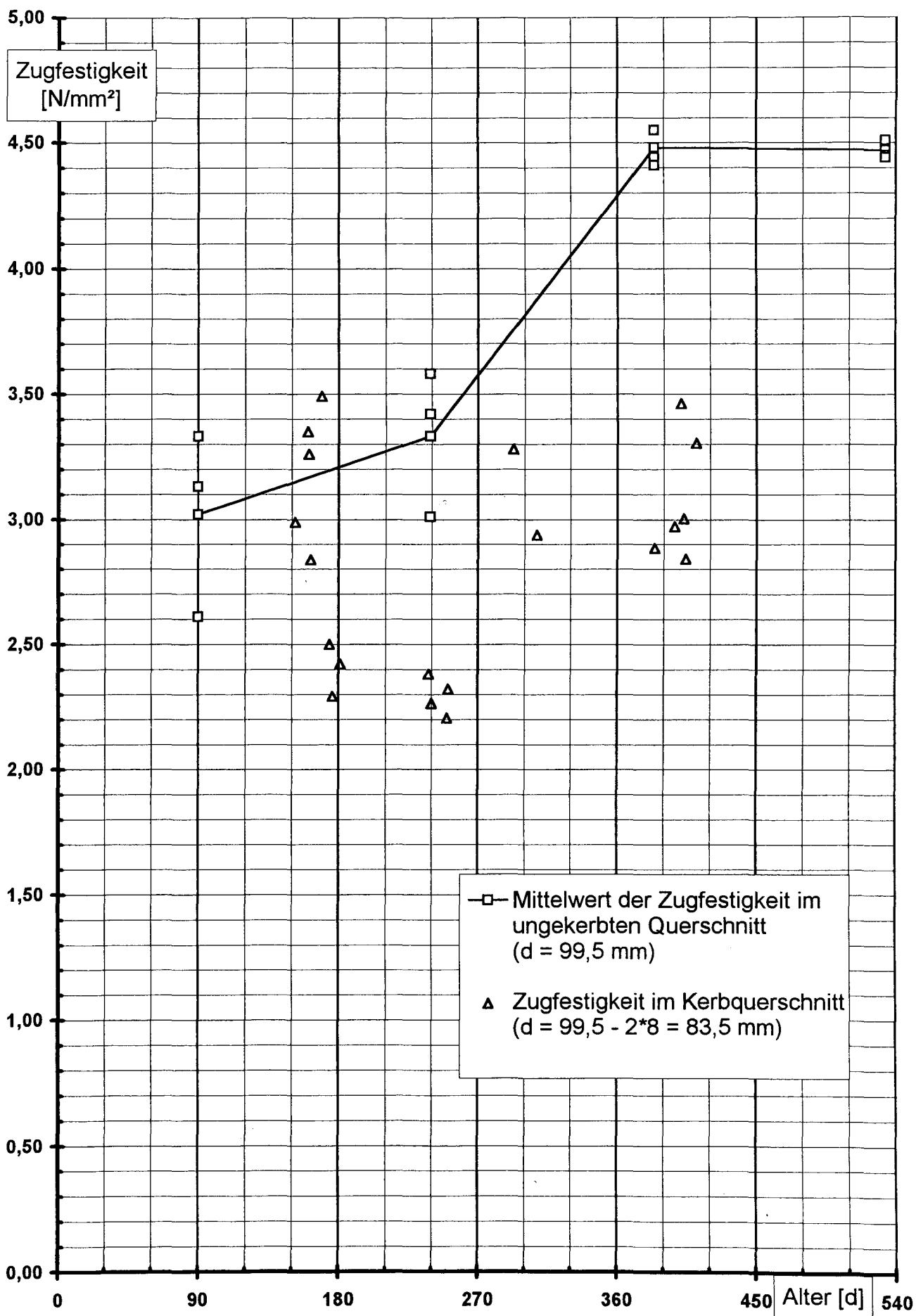


Bild i7:
Vergleich der Zugfestigkeiten gekerbter und ungekerbter Probekörper unter mittlerer Belastung

Es zeigen sich deutliche Einflüsse der Kerbung:

- Obwohl die Zugfestigkeiten der gekerbten Proben auf den Nettoquerschnitt bezogen wurden, liegen die Festigkeitswerte deutlich niedriger. Dies dürfte auf die unvermeidlichen Kerbspannungen zurückzuführen sein, die zu Spannungserhöhungen im Kerbbereich führen. Damit im Zusammenhang dürfte teilweise auch die vergleichsweise wesentlich größere Streuung dieser Versuchswerte stehen.
- Das Überfahren der Zugfestigkeit in einem verformungsgesteuerten Versuch führt unvermeidlich zu einer Reduktion des Scheitelwertes gegenüber einem kraftgesteuerten Versuch. So erwünscht die Fixierung des Meß- und Bruchbereiches auch ist, kann dennoch die Kerbung für Versuche dieser Zielsetzung nicht empfohlen werden, weil offensichtlich nicht bestimmbare Zusatzeinflüsse eingetragen werden.
- Die altersabhängige Zunahme der Zugfestigkeit ist aus den an gekerbten Proben gewonnenen Ergebnissen nicht erkennbar.

Der Versuchsablauf wird mit den Bildern 18, 19 und 20, zugeordnet den drei Alterungsstufen, erläutert. Es wurden Relaxationen ab 60 % und ab 40 % des gemessenen Scheitelwertes untersucht. Diese Bilder sind dreigeteilt: Mit dem obersten Diagramm wird der Versuchsablauf bzw. der Spannungsabfall im Zeitverlauf dargestellt; der Relaxationsbereich ist angedeutet. Das mittlere Diagramm soll den Spannungsabfall nach Durchführung des Relaxationsversuchs darstellen und die Möglichkeit einer Spannungserhöhung nach dem Relaxationsversuch dokumentieren. Das unterste Diagramm zeigt die beobachtete Relaxation und gibt das Verhältnis $\sigma_{c,t}/\sigma_{c,0}$ an, so daß ein unmittelbarer Vergleich mit der theoretischen Lösung möglich ist. In den Bildern 21 und 22 werden nur diese Darstellungen wiedergegeben. Es zeigte sich, daß eine Relaxationsdauer von annähernd 24 Stunden erforderlich ist, um zu brauchbaren Endwerten zu gelangen.

Die Bilder 23 und 24 zeigen beispielhaft Spannungs-Dehnungs-Diagramme von Beton unter mittlerem Zug für die Alterungsstufen 1 und 3, wobei, soweit möglich, der unmittelbare Bezug auf einzelne Versuche durch Angabe der Probenbezeichnung hergestellt wird. Mit diesen beiden Bildern sollen zusätzliche Informationen zu Bild 17 und zur Ermittlung der konstant gehaltenen Gesamt-Dehnung bei den Relaxationsversuchen, dargestellt in den Bildern 18 bis 22, gegeben werden.

Bild 25 zeigt, geordnet nach Alterungsstufen, die gemessenen Relaxationen.

7.2.2 Relaxation ohne vorherige Belastung bis zur Festigkeitsgrenze

In Bild 25 sind auch noch drei Relaxationsergebnisse eingetragen, die ohne vorheriges Durchlaufen eines verformungsgesteuerten Festigkeitswertes erzielt wurden (Bild 24 und Anlagen A 26 - A 28). Die Versuchskörper waren ungekerbt und etwa 550 Tage alt, sicherlich bis zur Gewichtskonstanz ausgetrocknet und wurden nur monoton bis auf 60 % der anzunehmenden zentrischen Kurzzeit-Zugfestigkeit belastet. Die Ergebnisse liegen i. M. bei $\sigma_{c,t}/\sigma_{c,0} = 0,75$ und damit deutlich höher als die Relaxationen nach Durchlaufen eines Festigkeitsmaximums mit einem Mittelwert von $\sigma_{c,t}/\sigma_{c,0} = 0,45$.

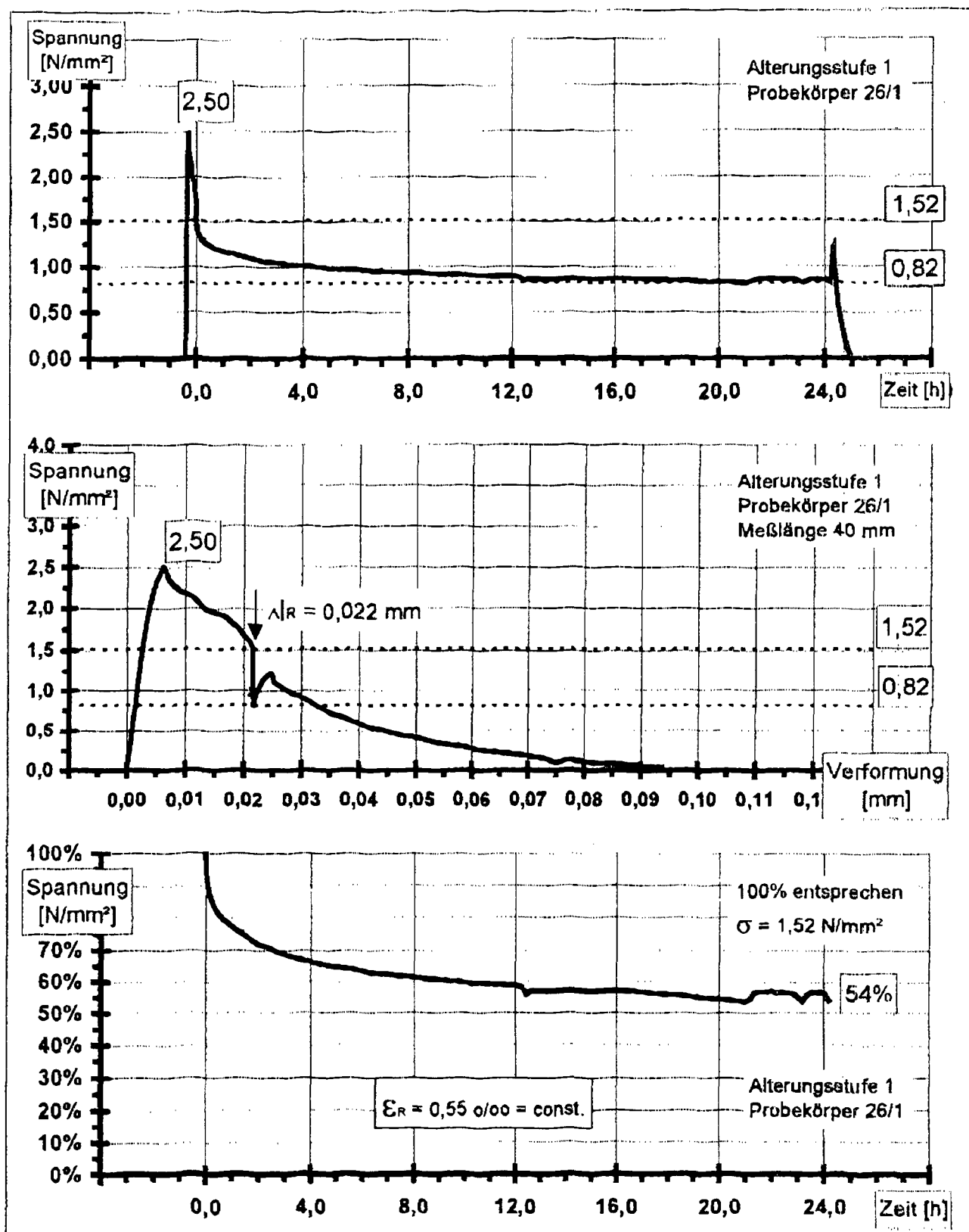


Bild 18: Spannungsrelaxation des Betons im verformungsgesteuerten Zugversuch nach überschrittenem Spannungsmaximum gekerbter Probekörper

Bei Erreichen von 60 % des im Probekörperquerschnitt maximal aufgenommenen Spannungswertes wird die Verformung konstant gehalten und der zeitliche Abfall der unter Verformungskonstanz abfallenden Zugspannung aufgezeichnet.

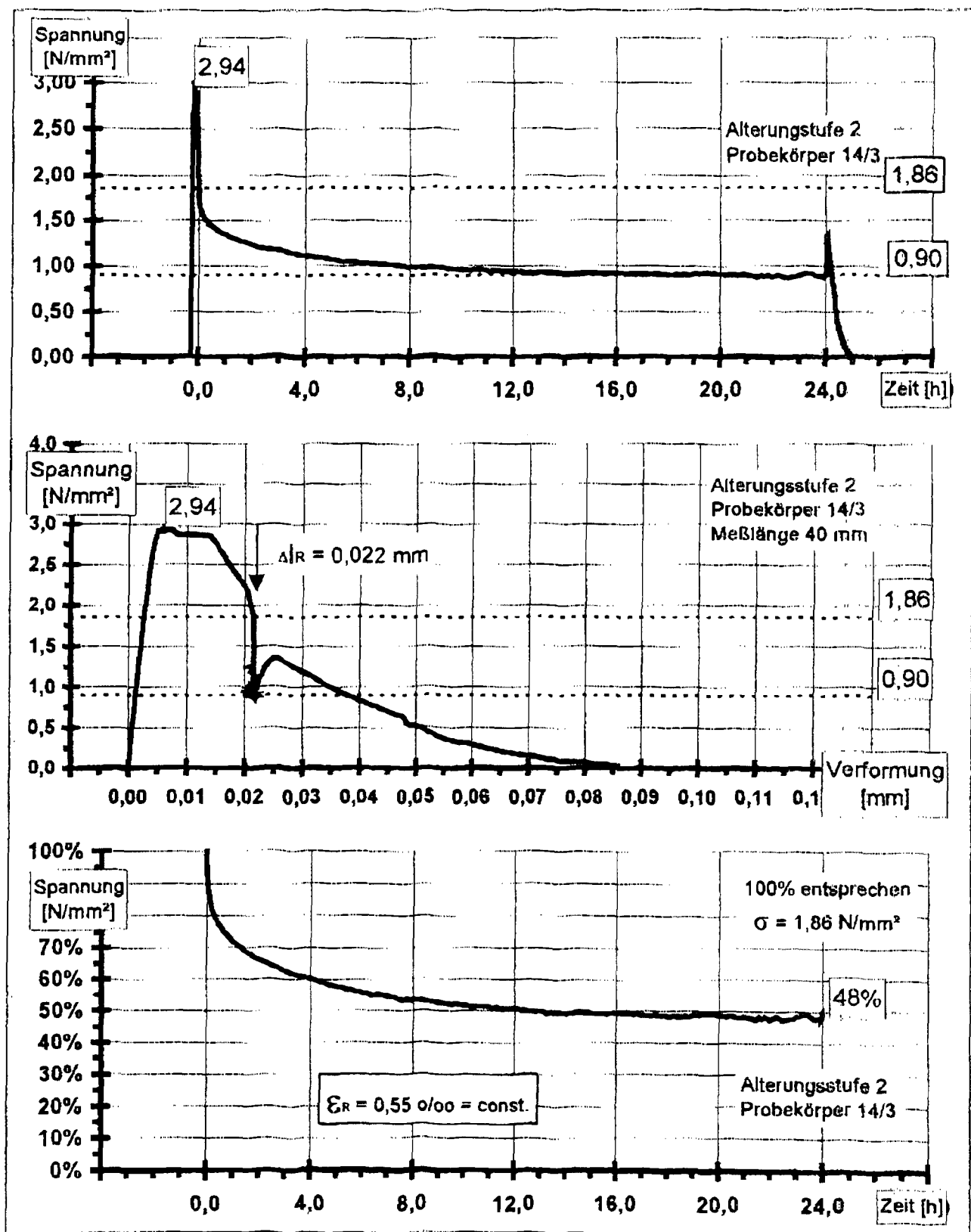


Bild 19: Relaxation des Betons nach verformungsgesteuertem Überfahren der Zugfestigkeitsgrenze;
 Verformung constant ab 60% der Festigkeitsgrenze

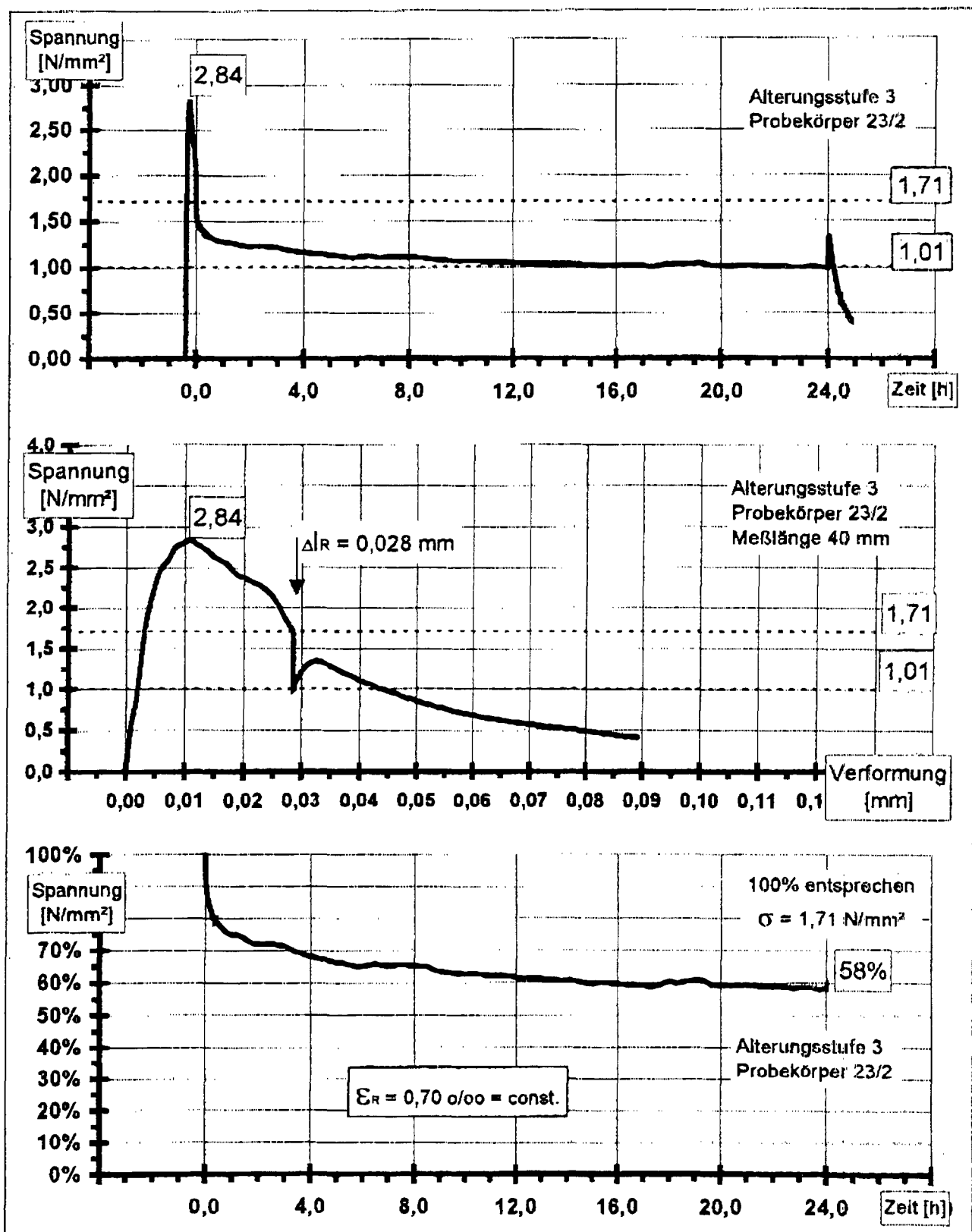


Bild 20: Relaxation des Betons nach verformungsgesteuertem Überfahren der Zugfestigkeitsgrenze;
Verformung constant ab 60% der Festigkeitsgrenze

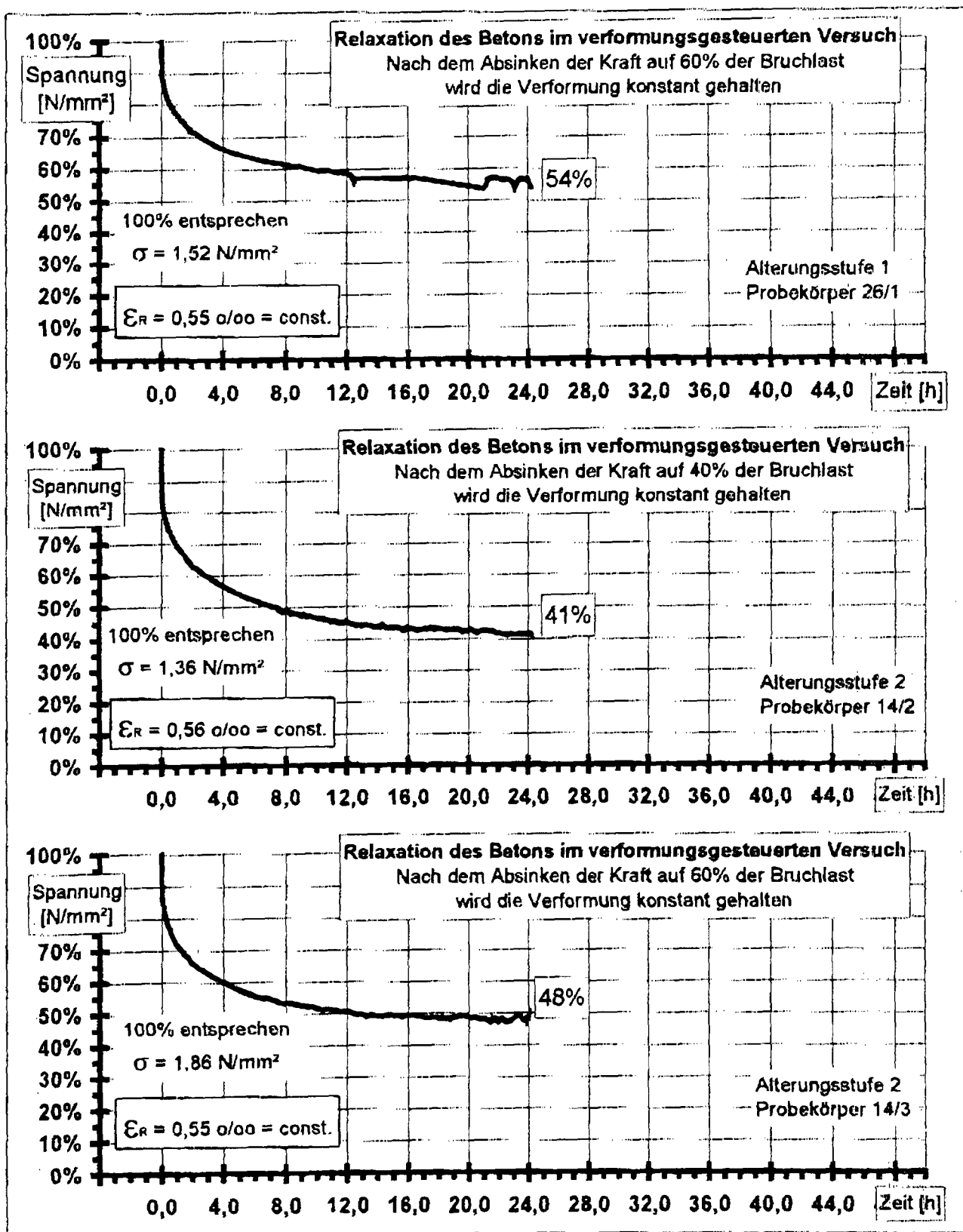


Bild 21: Relaxation des Betons nach verformungsgesteuertem Überfahren der Zugfestigkeitsgrenze;

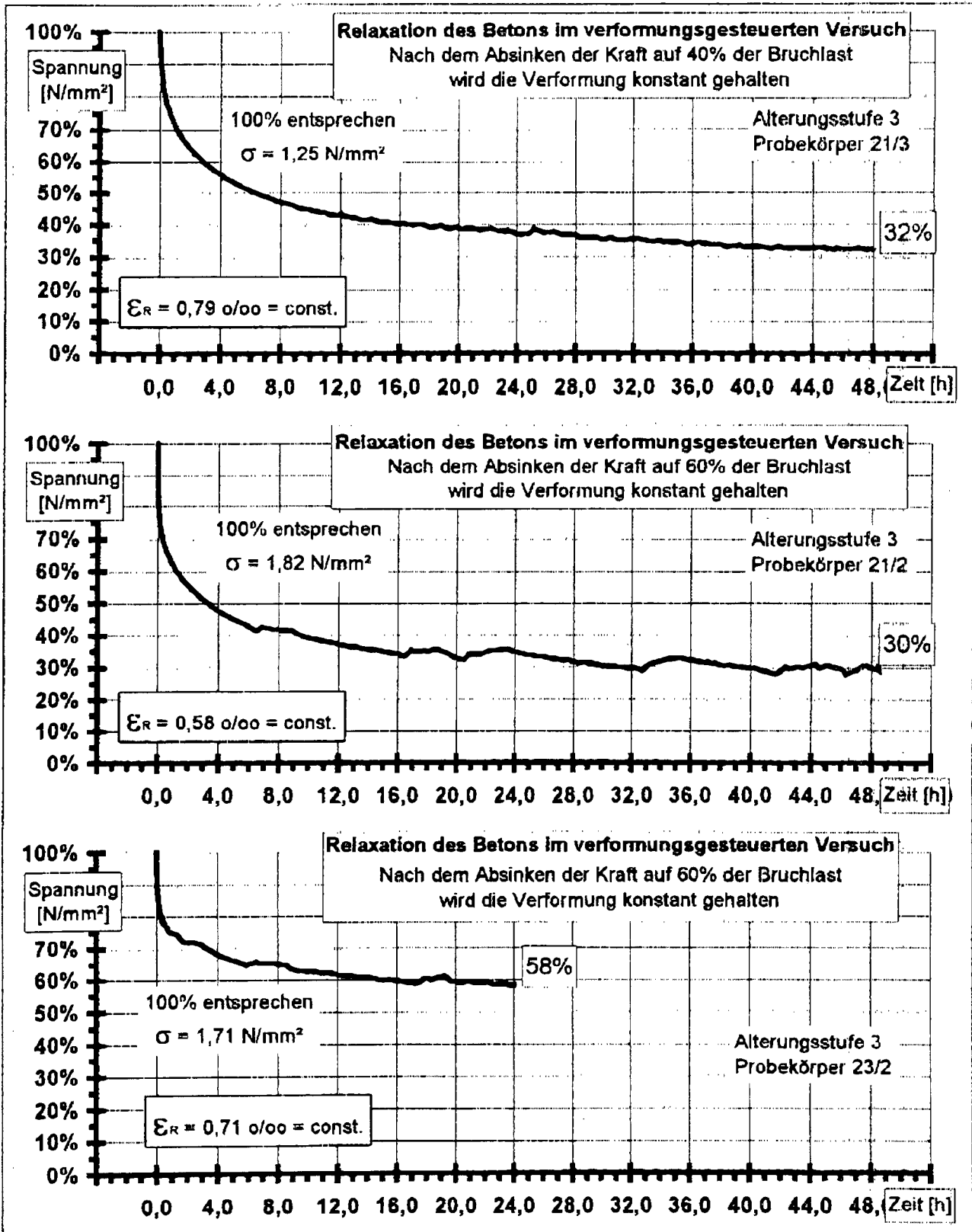


Bild 22: Relaxation des Betons nach verformungsgesteuertem Überfahren der Zugfestigkeitsgrenze;

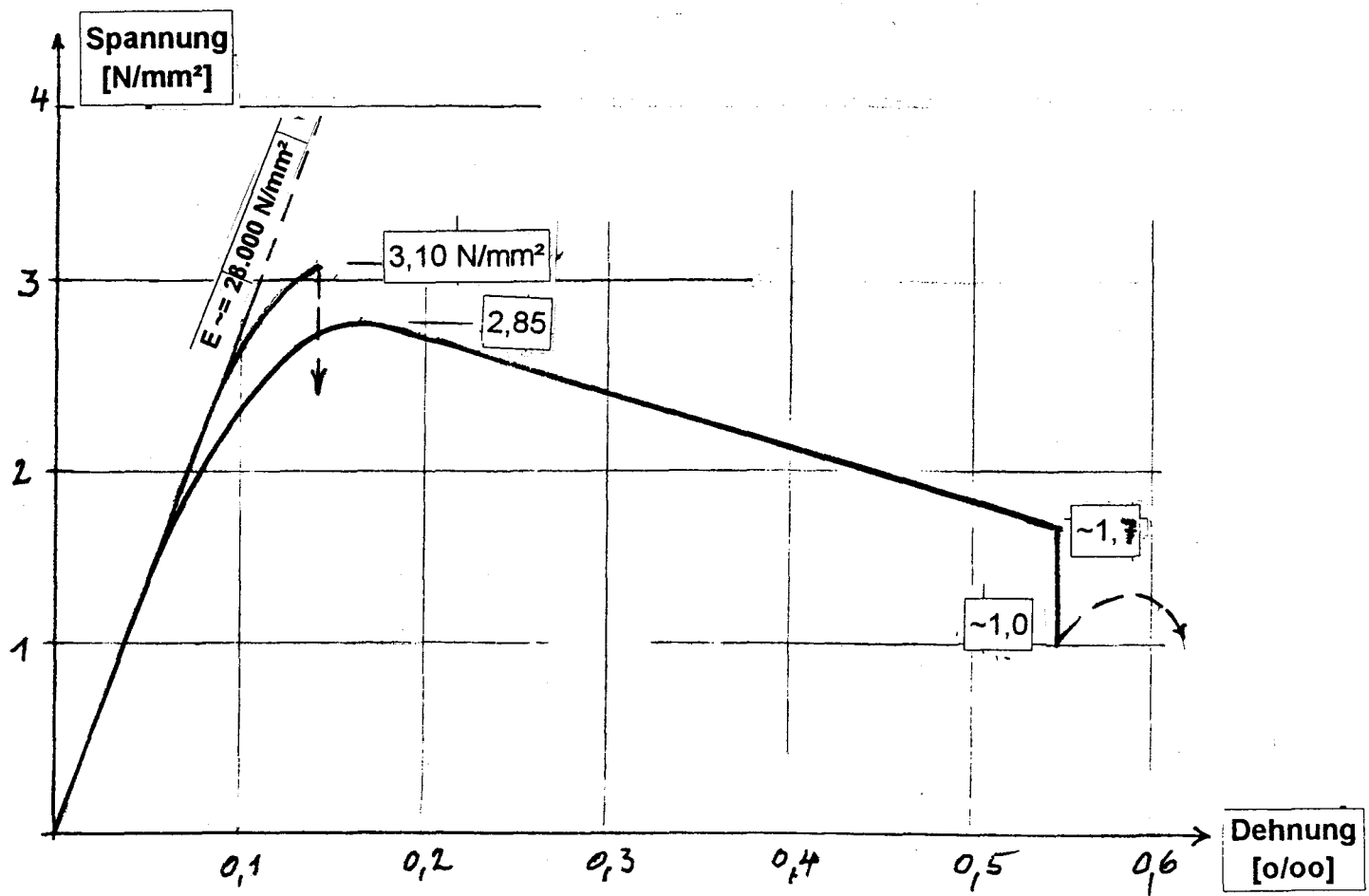


Bild 23: 1. Alterungsstufe; Interpolierte Mittelwerte

$\beta_{\text{ct, ungekerbt}} \sim 3,10 \text{ N/mm}^2$

$\beta_{\text{ct, gekerbt}} \sim 2,85 \text{ N/mm}^2$

Relaxation $\sigma_{\text{ct}}/\sigma_{\text{c0}} \approx 0,58$ bei $0,55 \text{ ‰}$

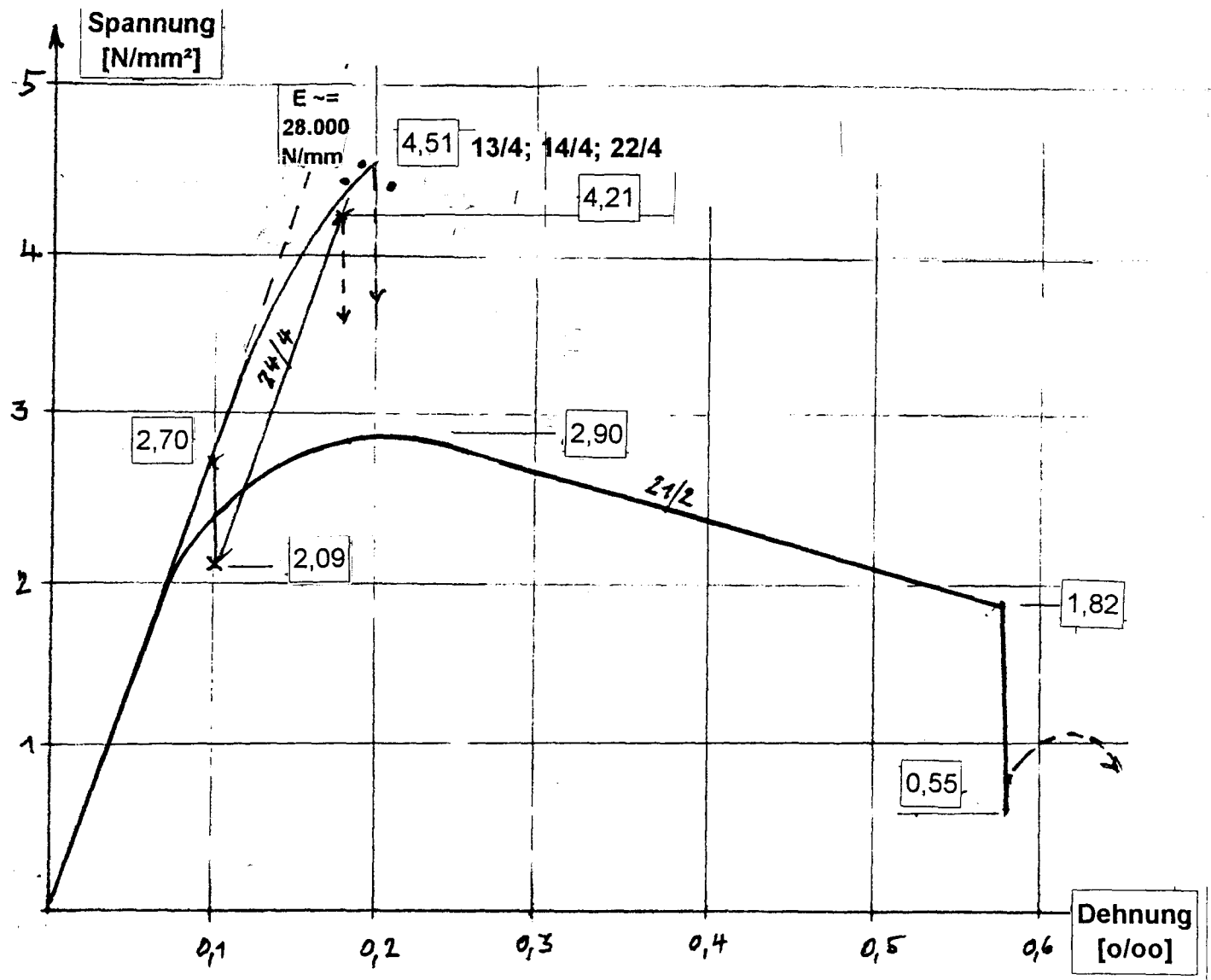


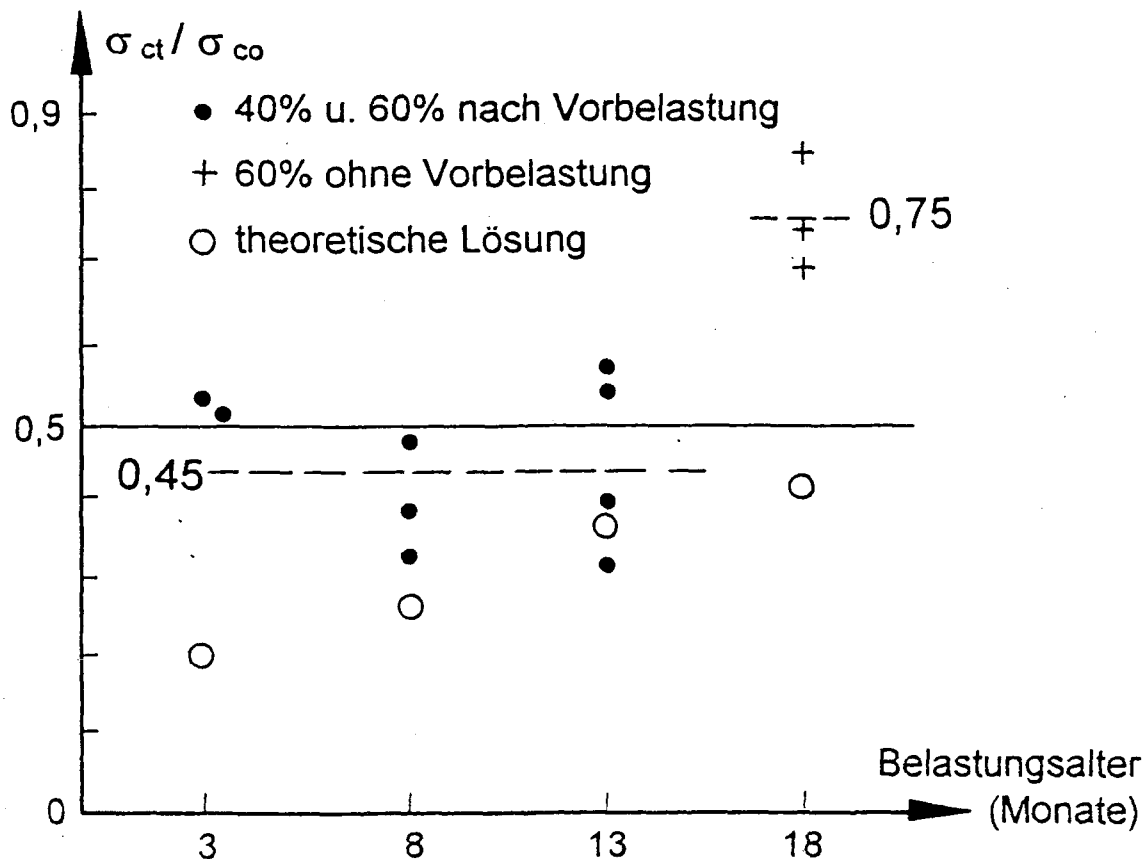
Bild 24: 3. Alterungsstufe; 390 d und 540 d

$\beta_{ct, \text{ungekerbt}} \sim 4,50 \text{ N/mm}^2$

$\beta_{ct, \text{gekerbt}} \sim 2,90 \text{ N/mm}^2$

Relaxation $\sigma_{ct}/\sigma_{c0} \approx 0,30$ (21/2) bei $0,58 \text{ ‰}$ (390 d)

$\sigma_{ct}/\sigma_{c0} \approx 0,77$ (24/4) bei $0,10 \text{ ‰}$ (540 d)



φ_t	= 3,10	= 2,30	= 1,50	= 1,20
ρ	= 0,93	= 0,94	= 0,95	= 0,95
$\sigma_{ct} / \sigma_{co}$	= 0,21	= 0,27	= 0,38	= 0,43

Bild 25: Vergleich der Relaxationsergebnisse mit der theoretischen Lösung

$$\sigma_{ct} / \sigma_{co} = 1 - \varphi_t / (1 + \varphi_t \cdot \rho)$$

7.2.3 Kritische Beurteilung

Die mittleren Relaxationswerte nach 7.2.1 und 7.2.2 liegen mit 0,45 bzw. 0,75 deutlich höher als die bisher im Bereich der Druckkriechversuche gewonnenen Ergebnisse. Dies läßt eine raschere "Versteifung" des Betons nach Zugbeanspruchung vermuten als nach Druckbeanspruchung. Gründe hierfür sind zunächst nicht erkennbar.

Bemerkenswert ist auch die Feststellung, daß Relaxationswerte nach 7.2.1 so gut wie keine Unterschiede in Abhängigkeit von den Altersstufen zeigen. ebenso konnten keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit von der Spannungsstufe gefunden werden. Diese Beobachtungen lassen vermuten, daß auch eine nahe der Festigkeitsgrenze beginnende Relaxation die Restspannung auf etwa 45 % der Festigkeitsgrenze reduziert.

Die Relaxationsversuche gaben auch die Möglichkeit, eine Abschätzung des Einflusses einer Zug-Vorbelastung auf die abschließend vorgenommene Zugfestigkeitsprüfung zu versuchen:

Nach einer verformungsgesteuerten Überschreitung der Festigkeitsgrenze wurden in den Versuchen nach 7.2.1 Zugfestigkeiten von etwa 40 % des Höchstwertes ermittelt; bei den Versuchen nach 7.2.2 ergaben sich etwa 95 %. Dies bedeutet, daß eine Zug-Vorbelastung bis zu 60 % der mittigen Kurzzeit-Zugfestigkeit nur einen geringen festigkeitsmindernden Einfluß besitzt.

8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde versucht, das Phänomen des Zugkriechens einer kritischen Untersuchung zu unterziehen und dabei auch auf bisher kaum untersuchte Probleme wie Rückkriechen und Relaxation einzugehen. Es zeigte sich Spannungsproportionalität der Kriechverformungen bis 70 % der zentrischen Zugfestigkeit. Die festgestellten Verhältnisswerte $\varphi = \varepsilon_K / \varepsilon_{el}$ lagen in der bei Druckkriechen gefundenen Größenordnung, wobei eine deutliche Abhängigkeit vom Belastungsalter auftrat. Dauerstand-Zugfestigkeiten scheinen bei etwa 75 % der zentrischen Kurzzeit-Zugfestigkeit aufzutreten. Überproportionales Zugkriechen konnte nicht beobachtet werden. Die Zug-Kriechverformungen scheinen in noch höherem Maße von den Lagerungsbedingungen und dem Mischungsverhältnis (Zementgehalt, W/Z-Wert) beeinflußt zu werden, als dies bei Druck-Kriechversuchen beobachtet wurde.

Ein Vergleich mit älteren Zugkriechuntersuchungen wurde trotz bestehender Bedenken unternommen und der Frage nachgegangen, ob und inwieweit Ähnlichkeit zwischen Zug- und Druckkriechen in Abhängigkeit von den maßgebenden Parametern besteht – was sich zu bestätigen scheint. Erwartungsgemäß wurde eine deutliche Abhängigkeit der Zug-Kriechverformungen unversiegelter Proben vom Belastungsalter in den Grenzen zwischen 90 und 386 Tagen festgestellt. Es wurden auch versiegelte Proben untersucht, mit vergleichbaren Ergebnissen.

Die Relaxationsversuche zeigten eine auffallend frühe "Versteifung" des Betons und unterschieden sich hierdurch von den im Rahmen von Druckversuchen gewonnenen Ergebnissen, die größere Relaxationen erwarten lassen.

Die Versuchsergebnisse lassen erkennen, daß bei ungerissenen biegebeanspruchten Bauteilen von annähernd gleichgroßen Kriechzahlen φ in der Zug- und Druckzone ausgegangen werden kann; die diesbezügliche, bisher übliche Rechenannahme wird somit bestätigt. Die gemessenen Relaxationswerte sollten daraufhin überprüft werden, ob und inwieweit in einem Bauteil, das z.B. durch Schwindbehinderung Zug-Zwangkräfte erhält, die Bildung von Zugrissen vermieden wird und die Zug-Zwangspannungen durch Relaxation abgebaut werden.

Die Versuchsdurchführung beanspruchte eine unerwartet lange Zeit, wofür der anfänglich bestehende Mangel an geeigneten Versuchseinrichtungen, die Schließung der TH Leipzig und der Wechsel in der Versuchsleitung ursächlich waren.

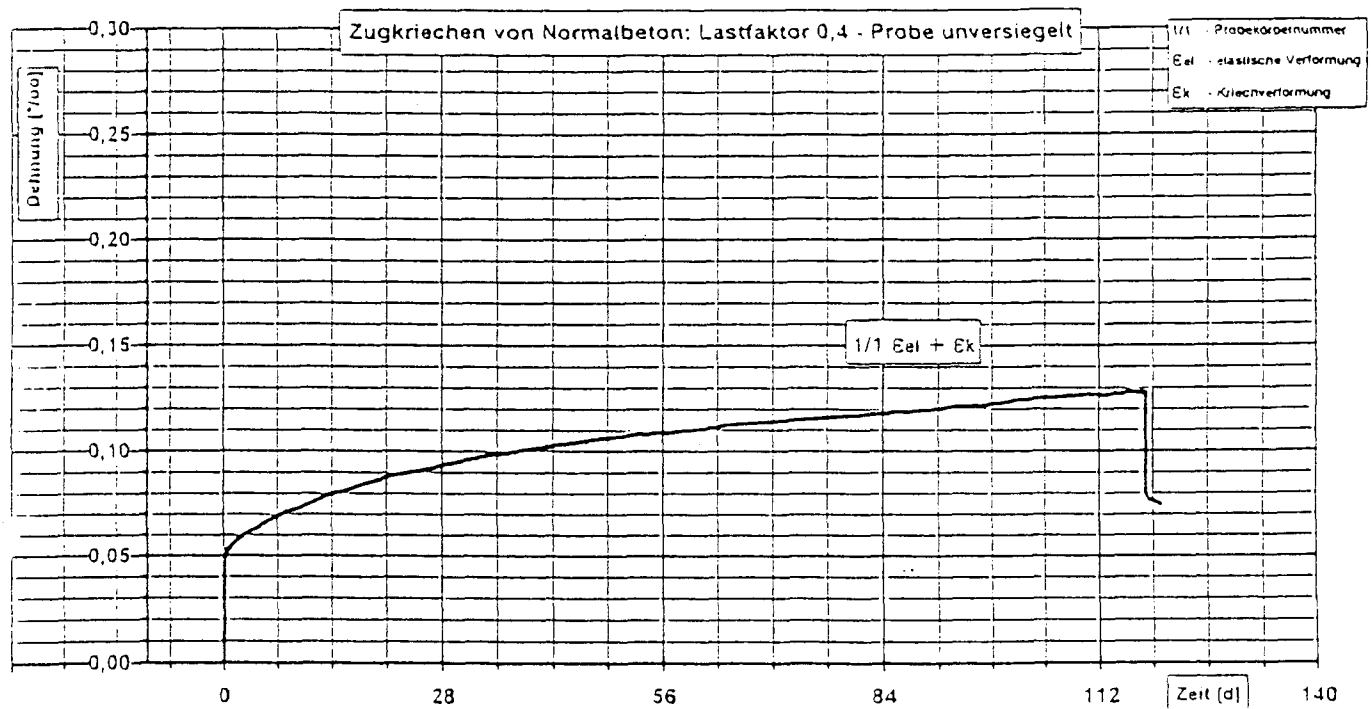
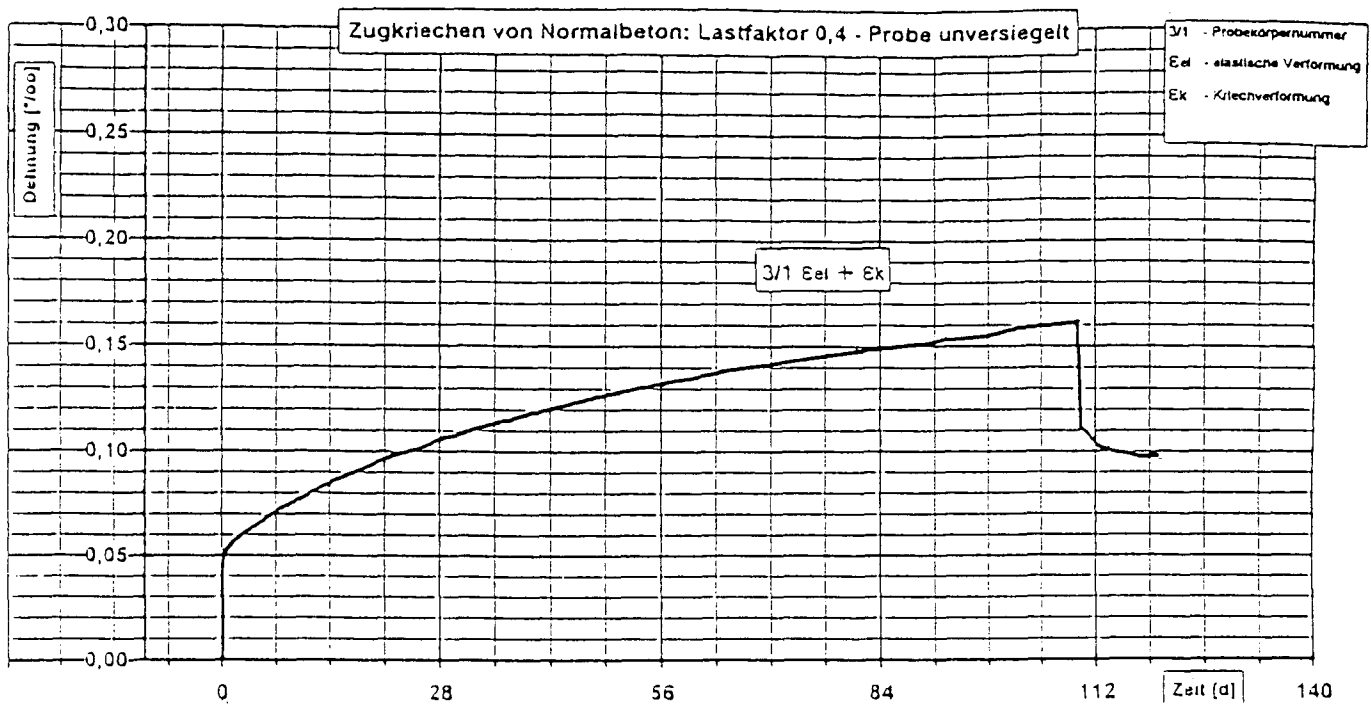
Der Deutschen Forschungsgemeinschaft gebührt Dank und Anerkennung für die nachhaltige Förderung dieses Forschungsvorhabens, das auch zu einer wesentlichen Erweiterung und Vertiefung der Erfahrungen mit der Durchführung wissenschaftlich anspruchsvoller Untersuchungen bei der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt Leipzig führte.

Literatur

- [1] Ross, A.D.: Concrete Creep Data, The Struct. Eng. 1937
- [2] Wagner, O.: Das Kriechen des unbewehrten Betons, H. 131 der Schriftenreihe des DAfStb, 1958
- [3] Rüsç, H.; Kordina, K.; Hilsdorf, H.K.: Einfluß des mineralischen Charakters der Zuschläge auf das Kriechen des Betons. Heft 146 der Schriftenreihe des DAfStb, 1962
- [4] Illston, I.M.: The creep of concrete under uniaxial tension. Univ. of London, Kingscollege 1965
- [5] Ward, M.A.; Cook, D.I.: The mechanisms of tensite creep in concrete. Univ. of Calgary, Fac. of Eng., 1968/69
- [6] Brooks, J.J.: Prediction of creep recovery of concrete from creep in tension and in compression. Ph. D. Thesis Deptm. Civ. Eng. Univ. of Leeds, 1976
- [7] Trost, H.: Spannweite der Gedanken (Dischinger-Gedenkschrift). Springer-Verlag, Berlin 1987
- [8] Kordina, K., u.a.: Bemessungshilfsmittel zu Eurocode 2, Teil 1, 2. Auflage, Beuth Verlag GmbH, 1992, Heft 425, Schriftenreihe des DAfStb

ANHANG

A 1 - A 20	Meßwerte der Zugkriechversuche
A 21	Schwindmessungen
A 22 - A 25	Rückkriechen
A 26 - A 28	Relaxation im elastischen Bereich (60 % der Kurzzeitfestigkeit)
A 29	Zement Karsdorf, Analyse
A 30	Mischungsrezept [3]
A 31/1 - A 31/3	Versuchs-Einrichtung
A 32	DMS-Verteilung auf dem Probekörper
A 33	Wheatstone'sche Brücke
A 34	Steuerung + Meßwertaufnahme der Relaxationsversuche
A 35/1 - 35/2	Photos
A 36/1 - 36/3	Mischungsverhältnis
A 37	Rüttler



Altersstufe 1

Belastungsalter:

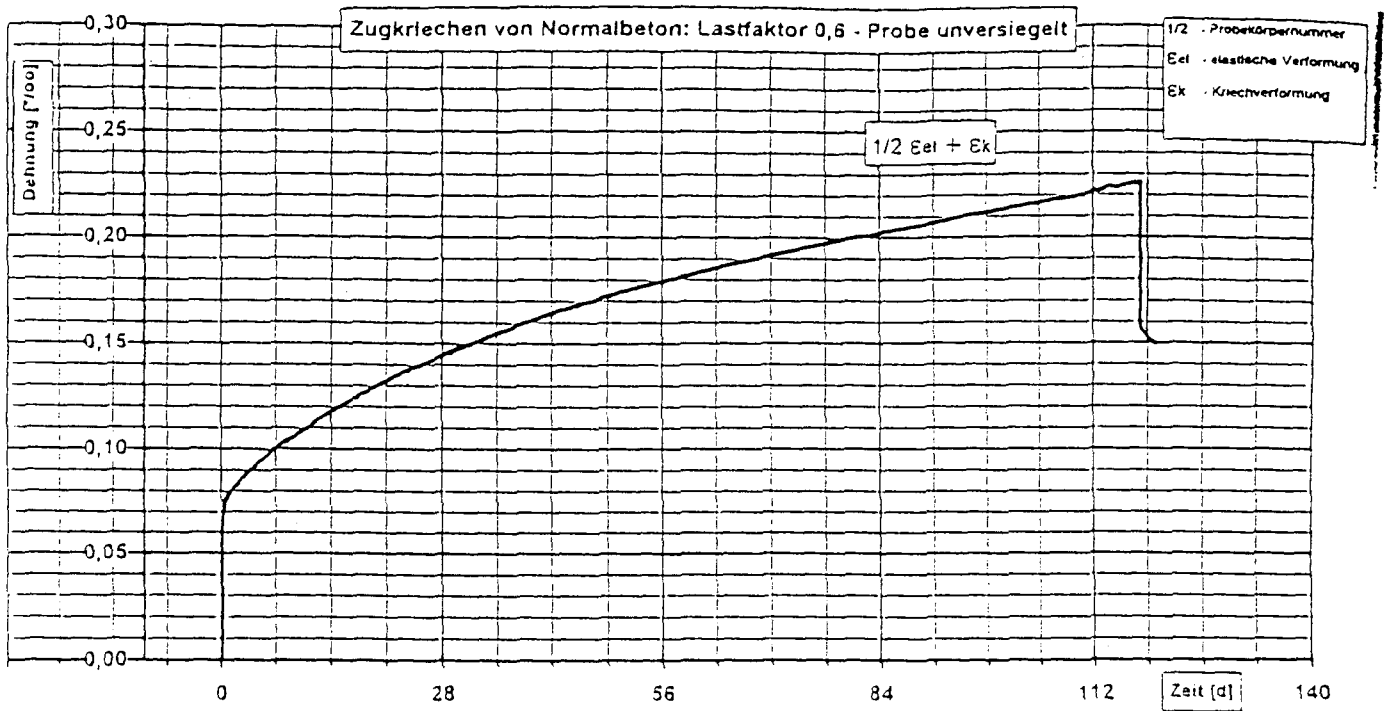
92 Tage

unversiegelt

$f_{ct} = 3,02 \text{ N/mm}^2$

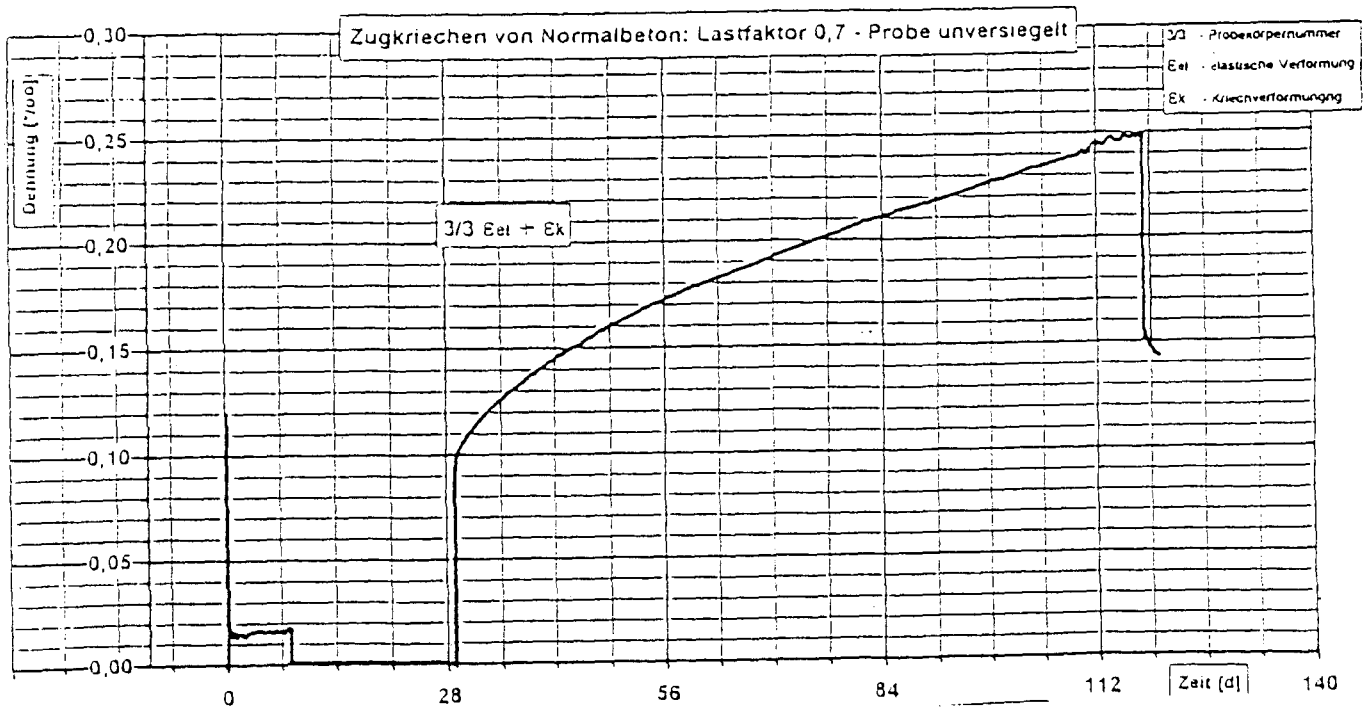
$\sigma_k = 1,21 \text{ N/mm}^2$

$\epsilon_{el} = 0,043 \text{ ‰}$

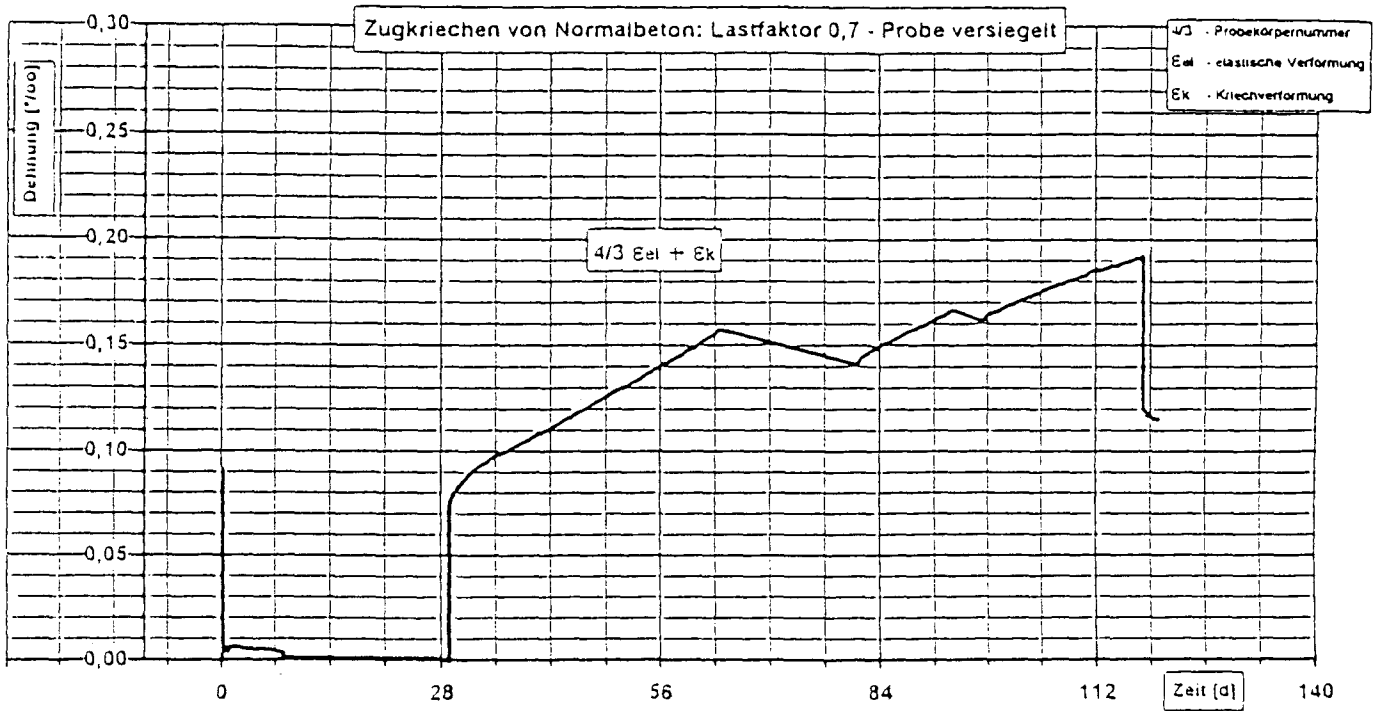


Altersstufe I Belastungsalter: 92 Tage unversiegelt
 $f_{ct} = 3,02 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_k = 1,81 \text{ N/mm}^2$ $\epsilon_{a1} = 0,065 \text{ ‰}$

A4



Altersstufe I Belastungsalter: 92 Tage unversiegelt
 $f_{ct} = 3,02 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_k = 2,11 \text{ N/mm}^2$ $\epsilon_{a1} = 0,075 \text{ ‰}$



Altersstufe 1

Belastungsalter:

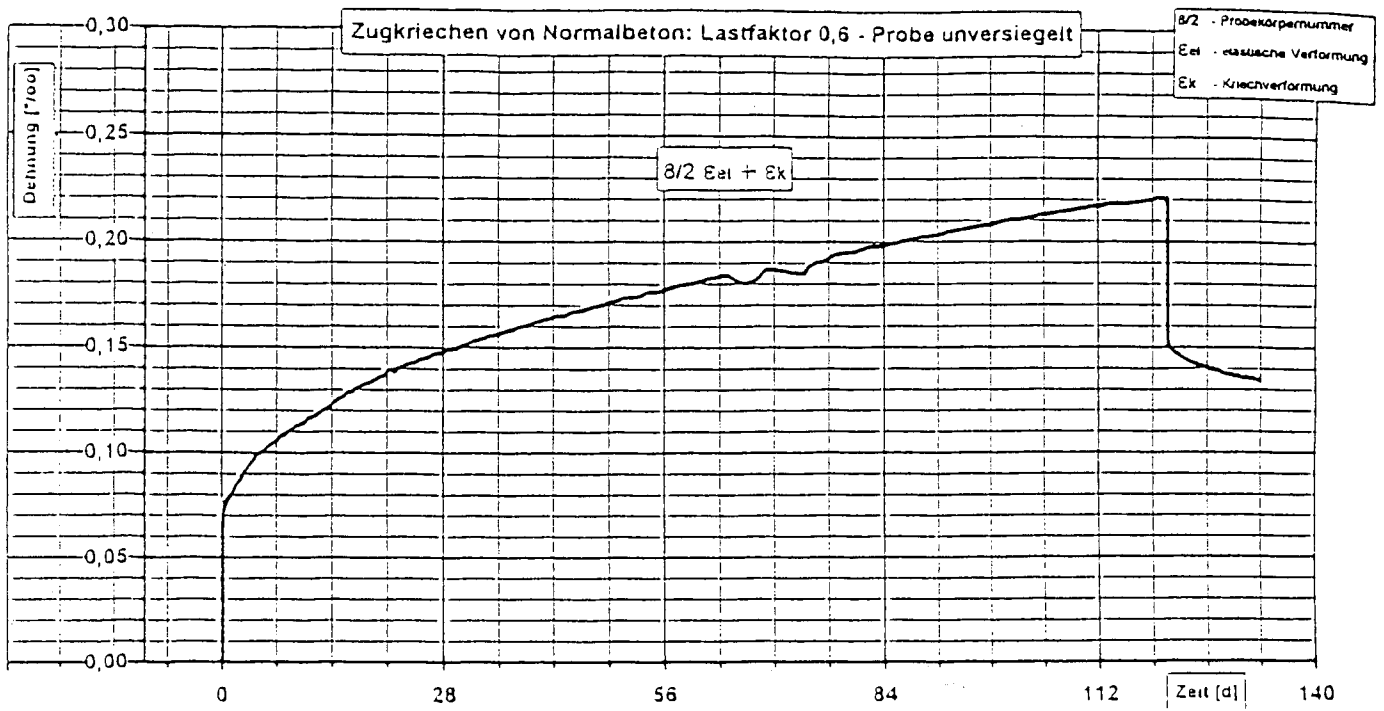
92 Tage

versiegelt

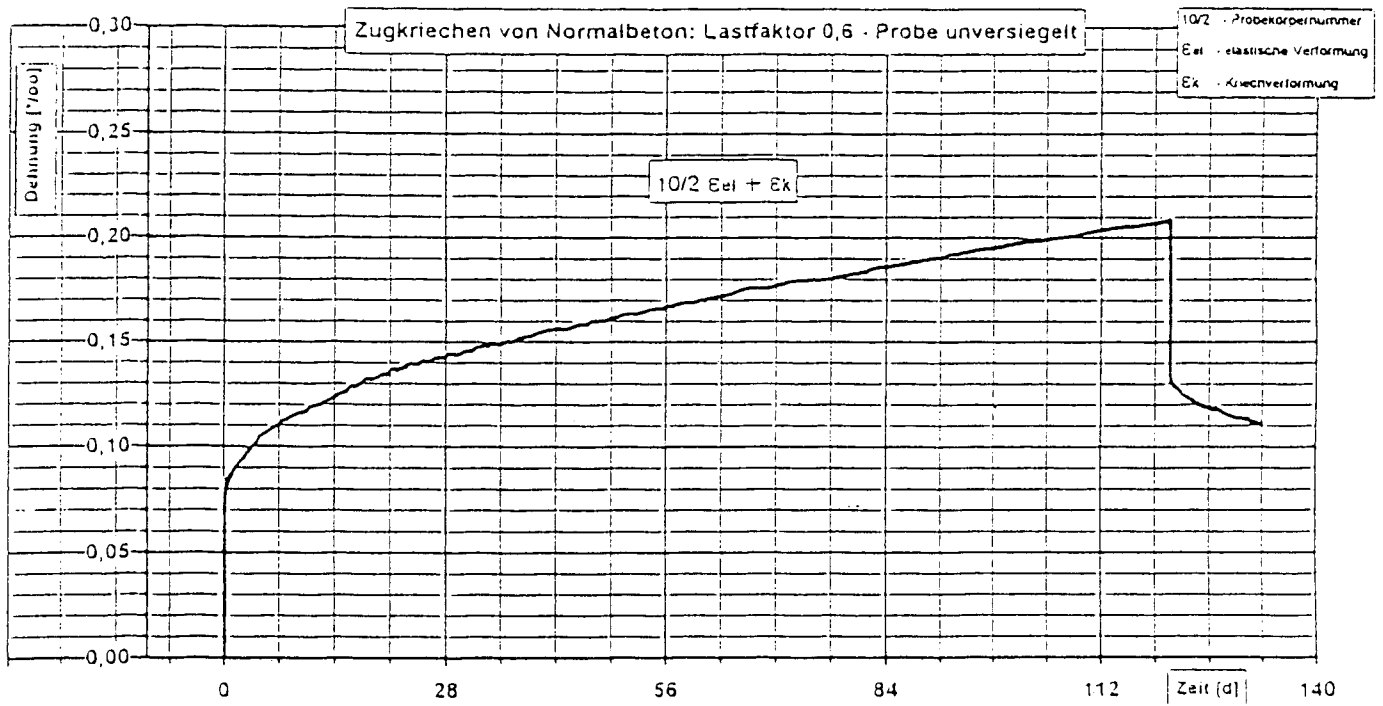
$f_{ct} = 3,02 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_k = 2,11 \text{ N/mm}^2$

$\epsilon_{e1} = 0,075 \text{ ‰}$



A7



Altersstufe 2

Belastungsalter:

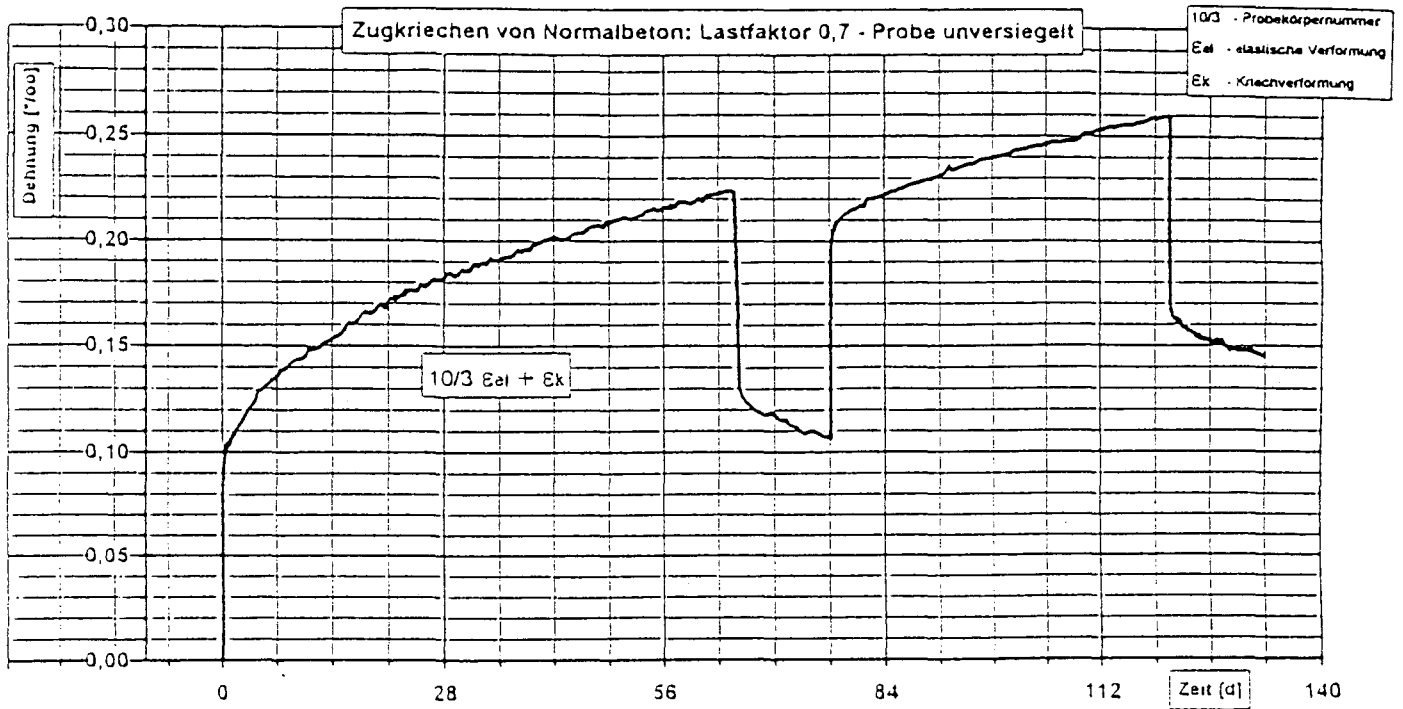
243 Tage

unversiegelt

$$f_{ct} = 3,33 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_k = 2,00 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{e1} = 0,071 \text{ ‰}$$



Altersstufe 2

Belastungsalter:

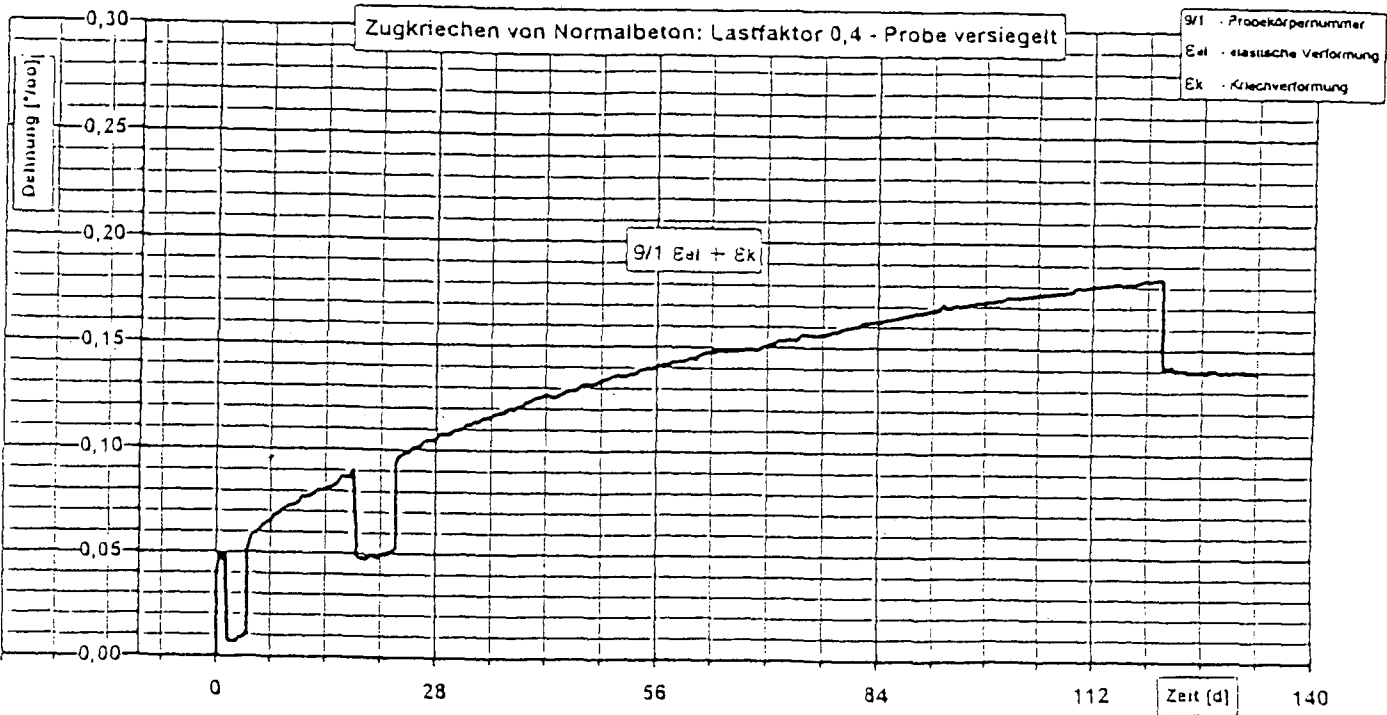
243 Tage

unversiegelt

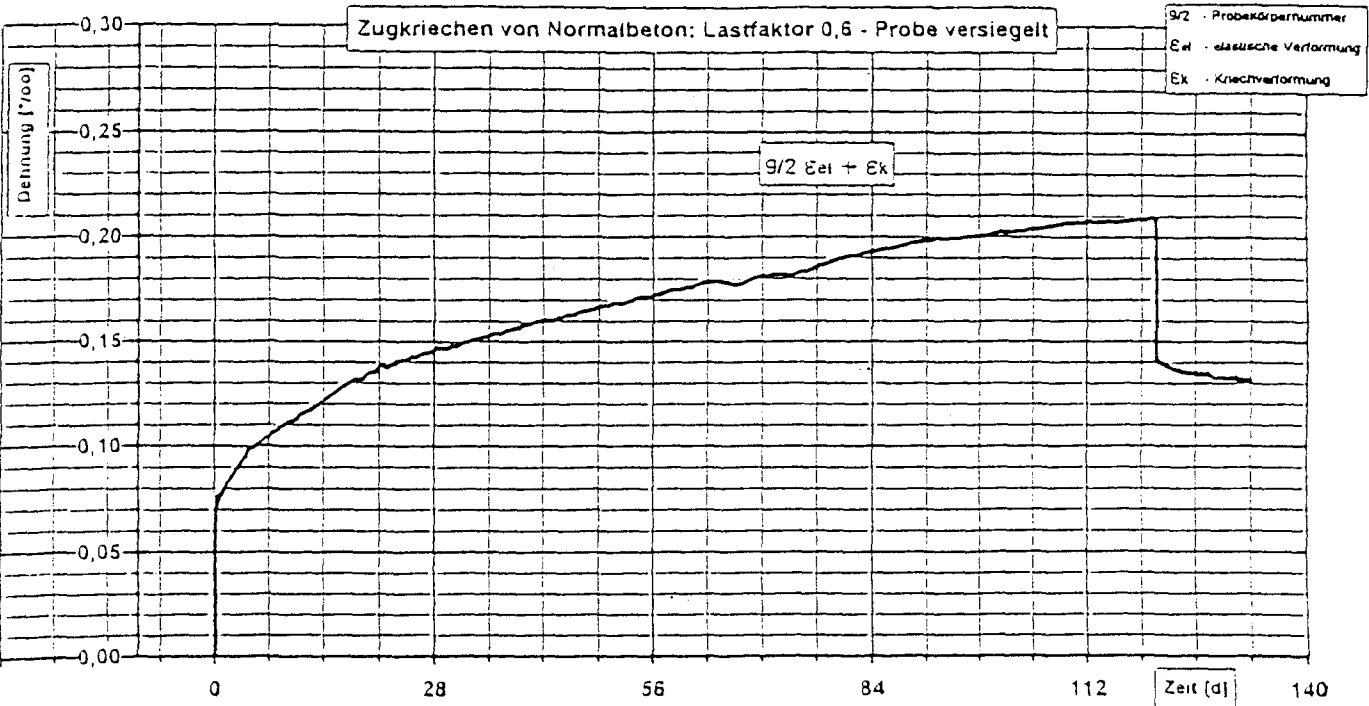
$$f_{ct} = 3,33 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_k = 2,34 \text{ N/mm}^2$$

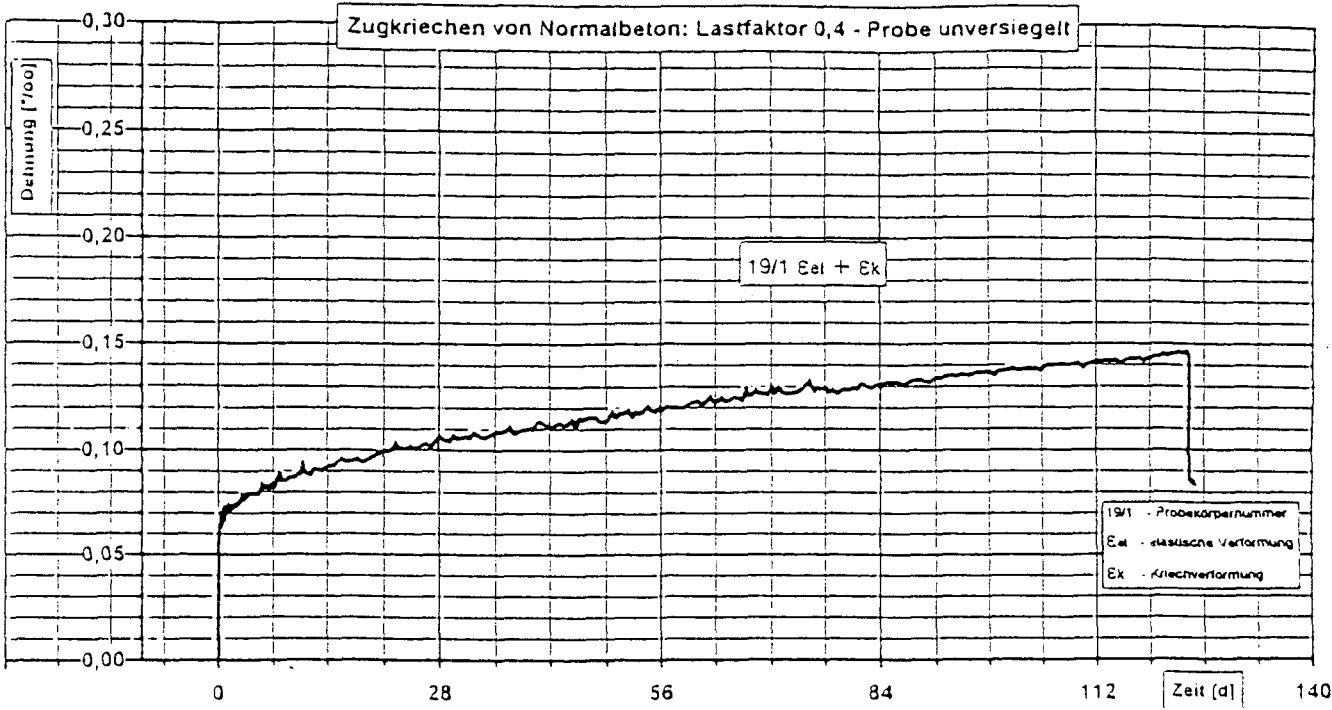
$$\epsilon_{s1} = 0,084 \text{ ‰}$$



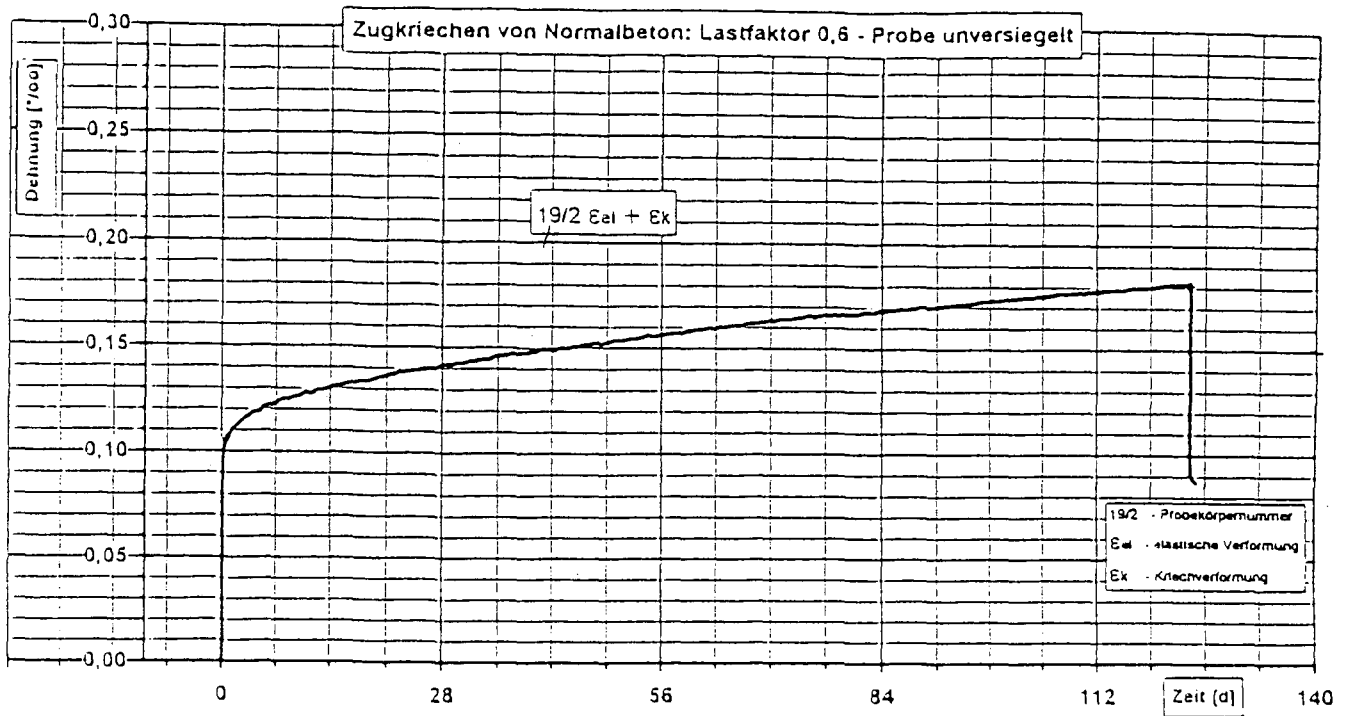
Altersstufe 2 Belastungsalter: 243 Tage versiegelt
 $f_{ct} = 3,33 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_k = 1,34 \text{ N/mm}^2$ $\epsilon_{e1} = 0,048 \text{ ‰}$



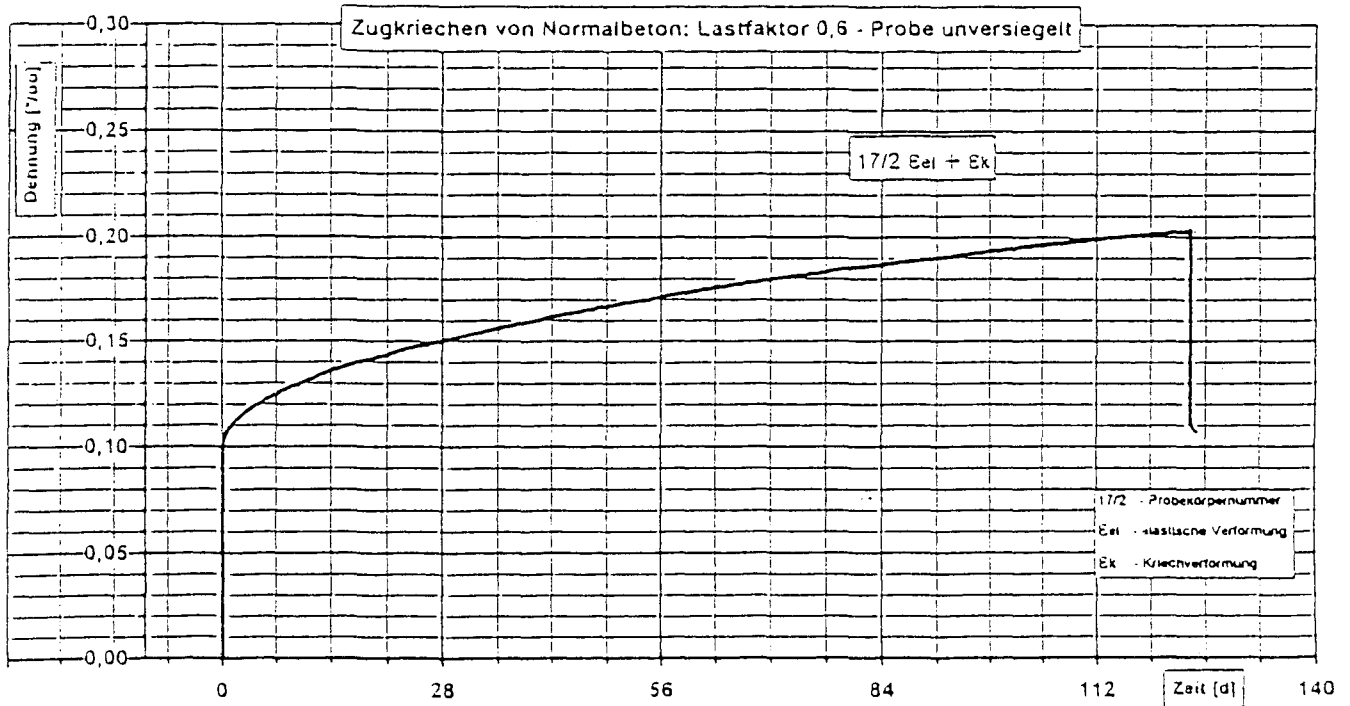
Altersstufe 2 Belastungsalter: 243 Tage versiegelt
 $f_{ct} = 3,33 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_k = 2,00 \text{ N/mm}^2$ $\epsilon_{e1} = 0,071 \text{ ‰}$



Altersstufe 3	Belastungsalter:	386 Tage	unversiegelt
	$f_{ct} = 4,48 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_k = 1,79 \text{ N/mm}^2$	$\epsilon_{s1} = 0,064 \text{ ‰}$



A 13



Altersstufe 3

Belastungsalter:

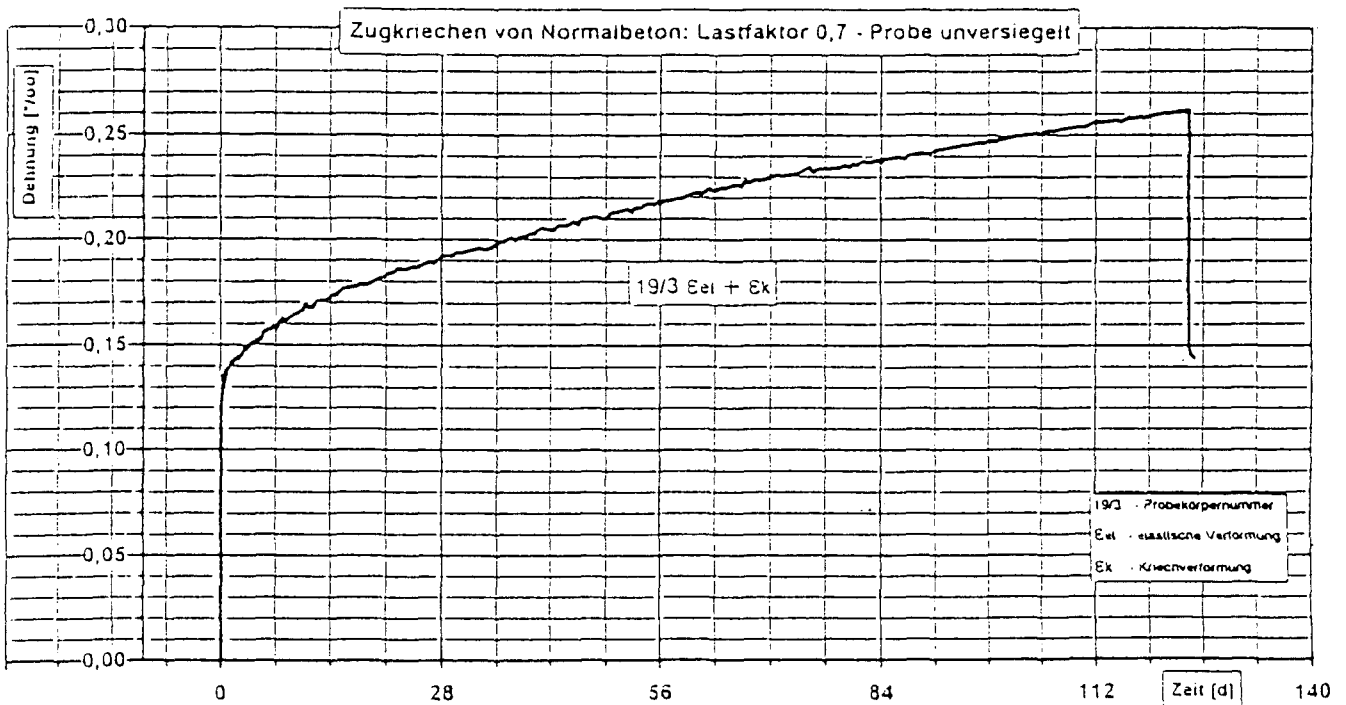
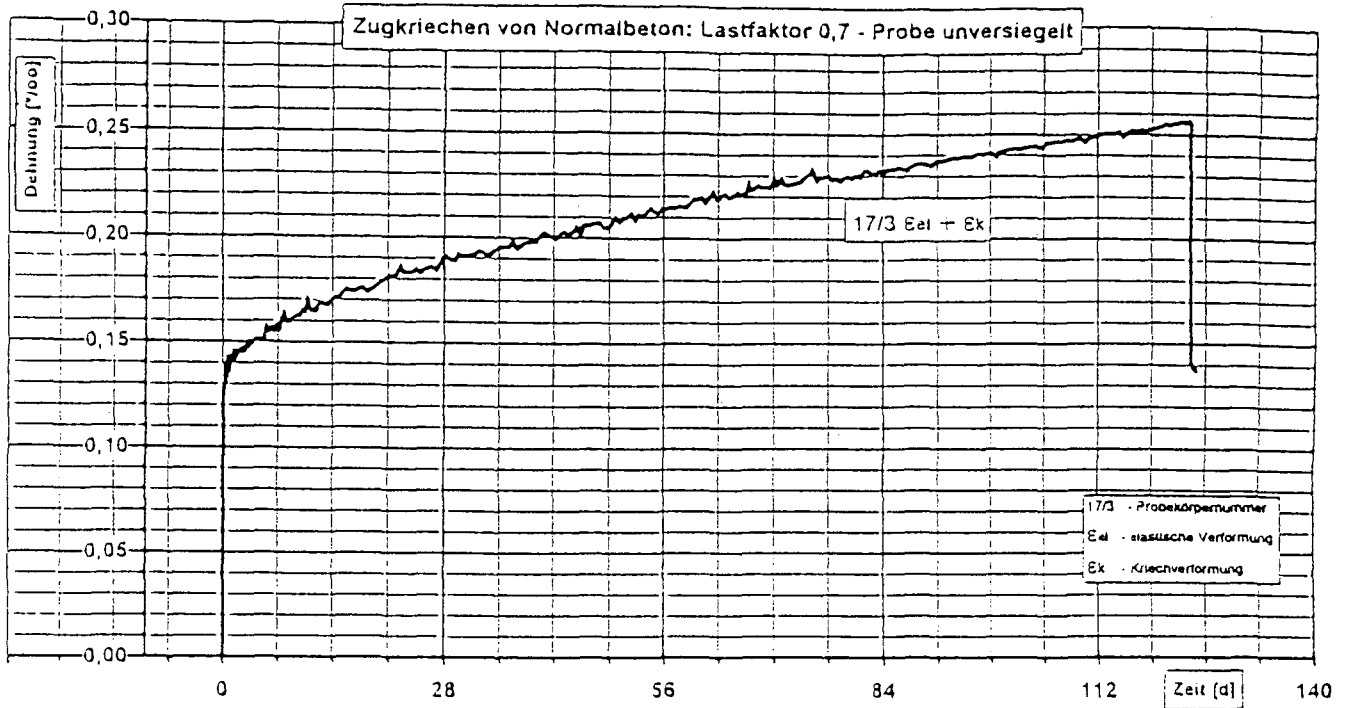
386 Tage

unversiegelt

$$f_{ct} = 4,48 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_k = 2,69 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{e1} = 0,096 \text{ ‰}$$



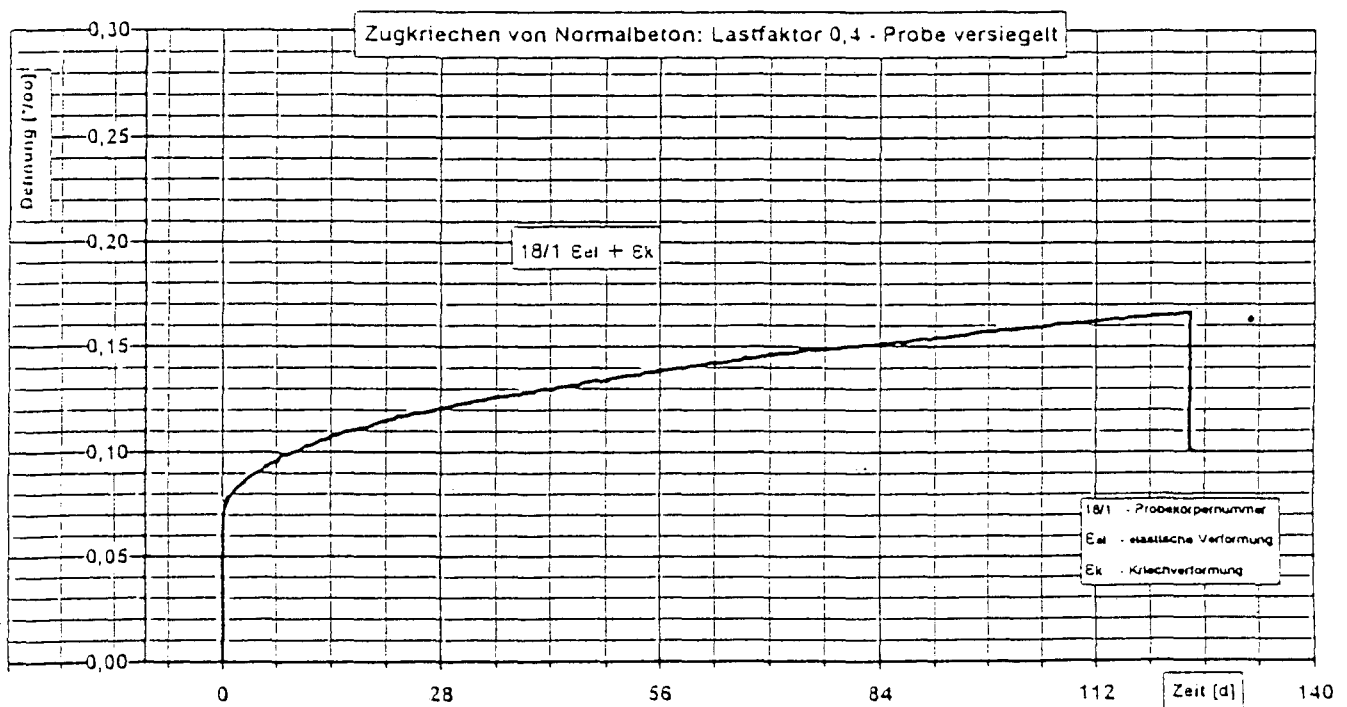
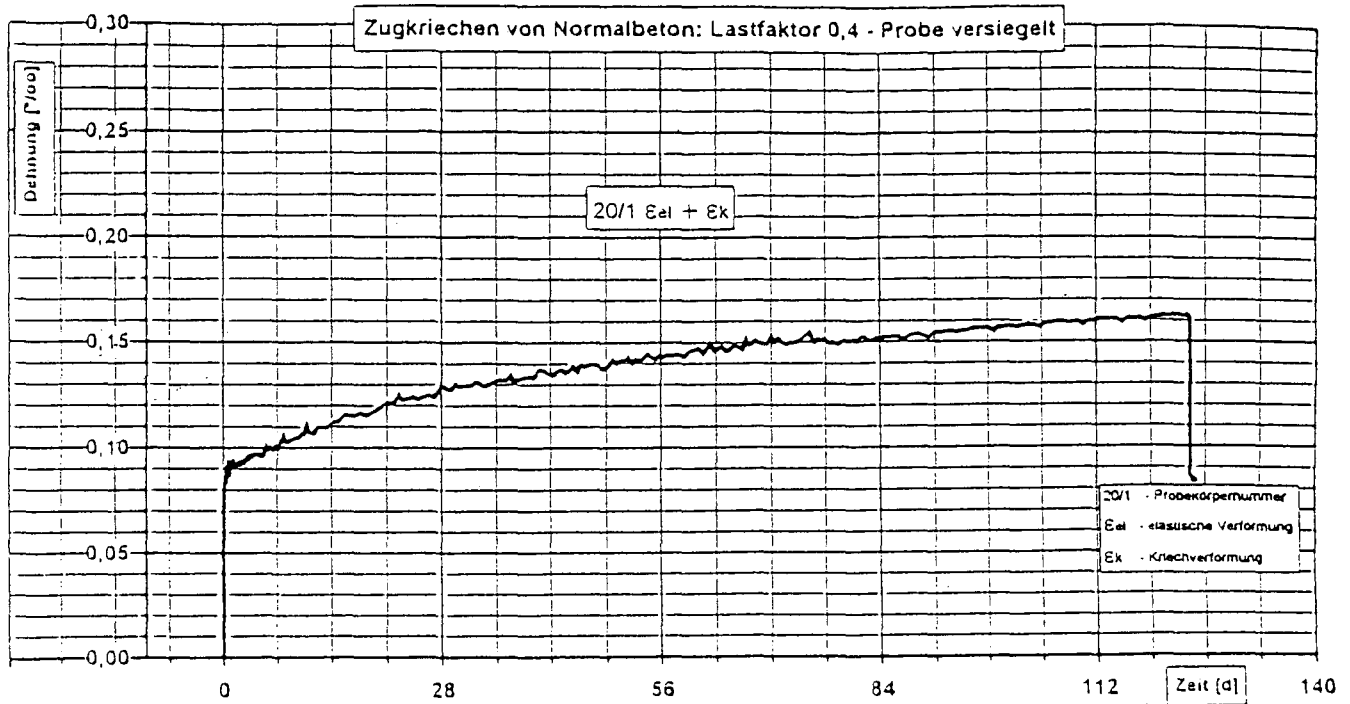
Altersstufe 3

Belastungsalter:

386 Tage

unversiegelt

 $f_{ct} = 4,48 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_k = 3,14 \text{ N/mm}^2$ $\epsilon_{e1} = 0,112 \text{ ‰}$



Altersstufe 3

Belastungsalter:

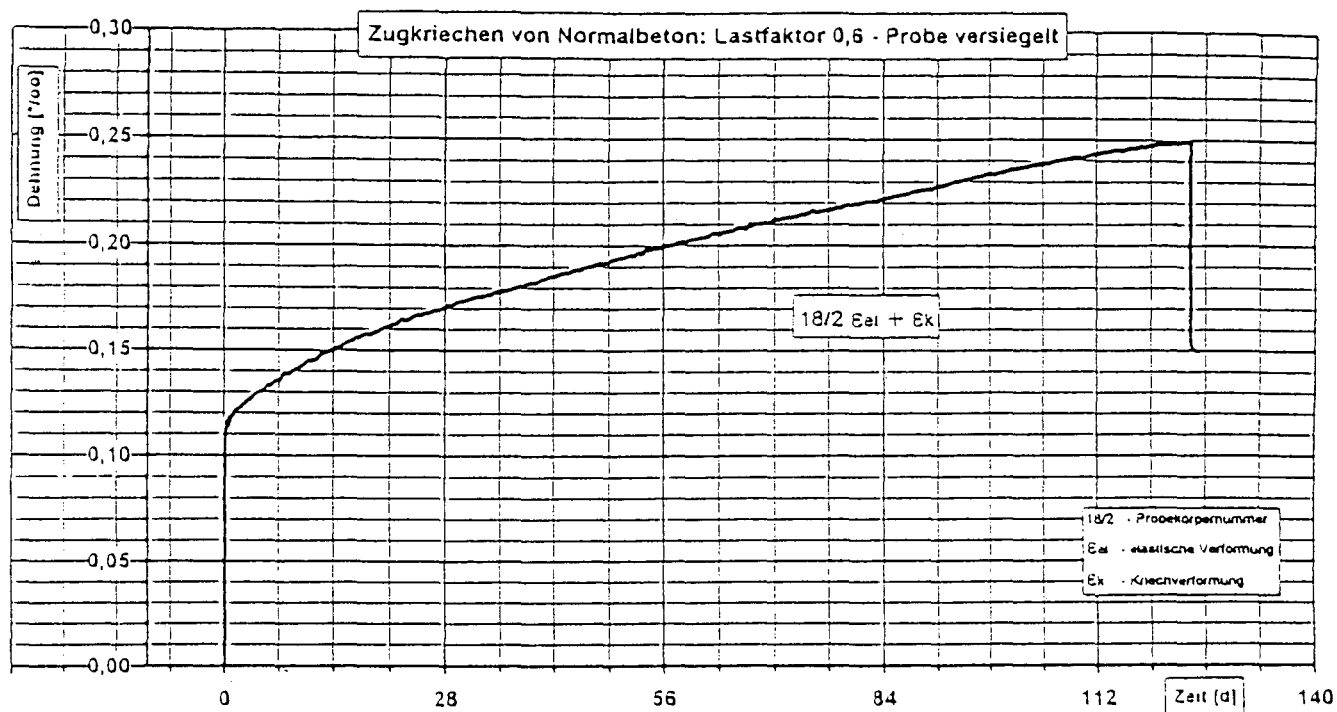
386 Tage

versiegelt

$$f_{ct} = 4,48 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_k = 1,79 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{el} = 0,064 \text{ ‰}$$



Altersstufe 3

Belastungsalter:

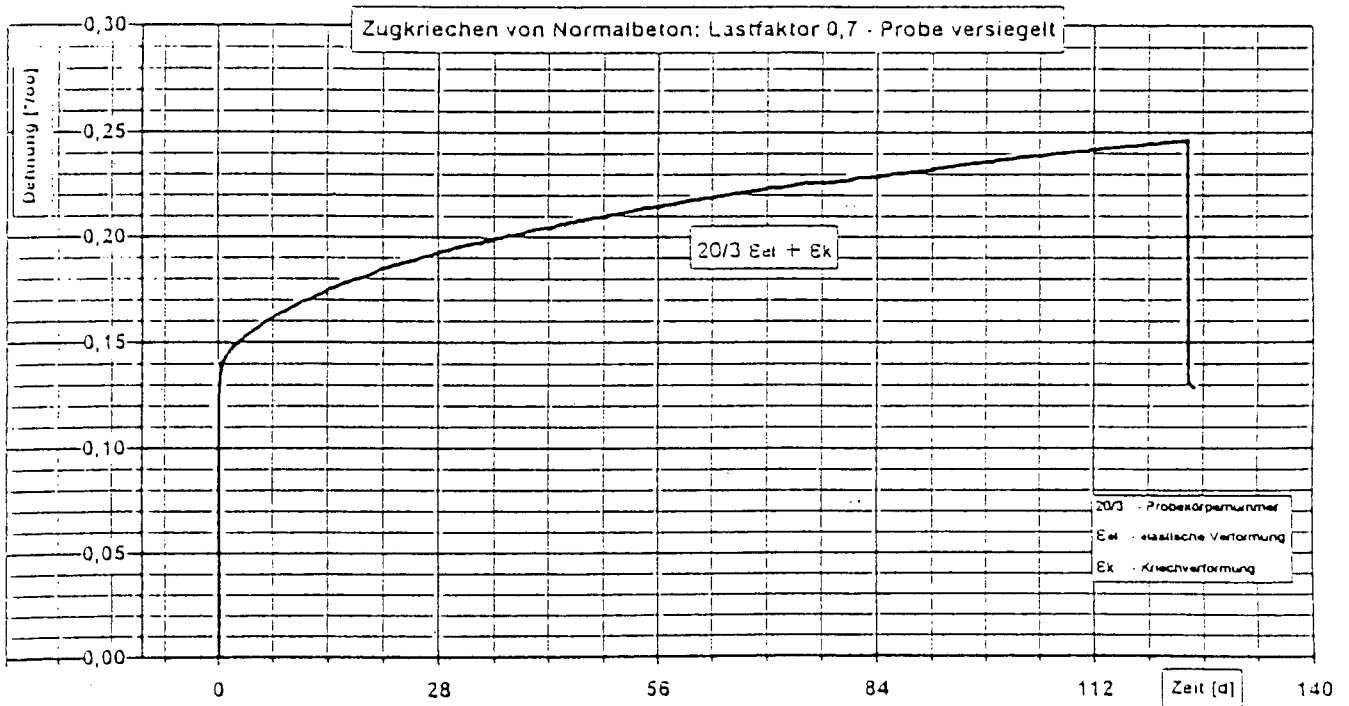
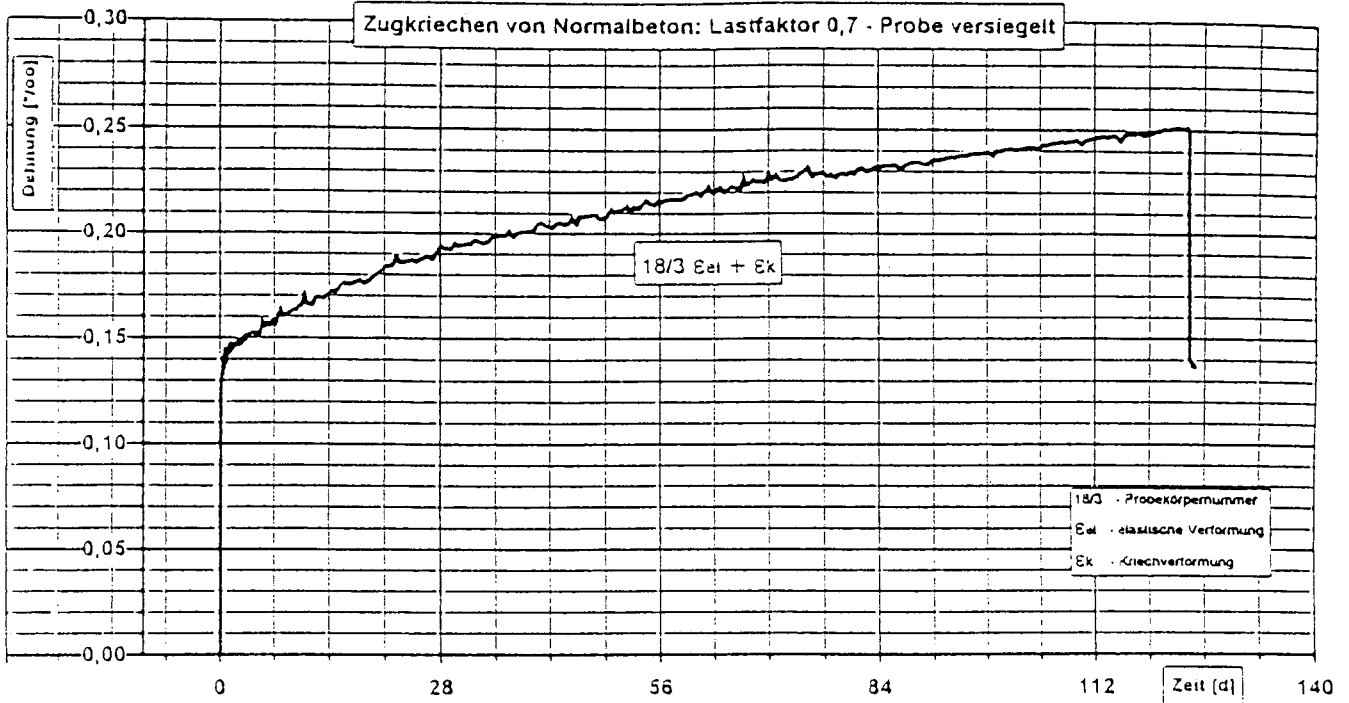
$$f_{ct} = 4,48 \text{ N/mm}^2$$

386 Tage

$$\sigma_k = 2,69 \text{ N/mm}^2$$

versiegelt

$$\epsilon_{s1} = 0,096 \text{ ‰}$$



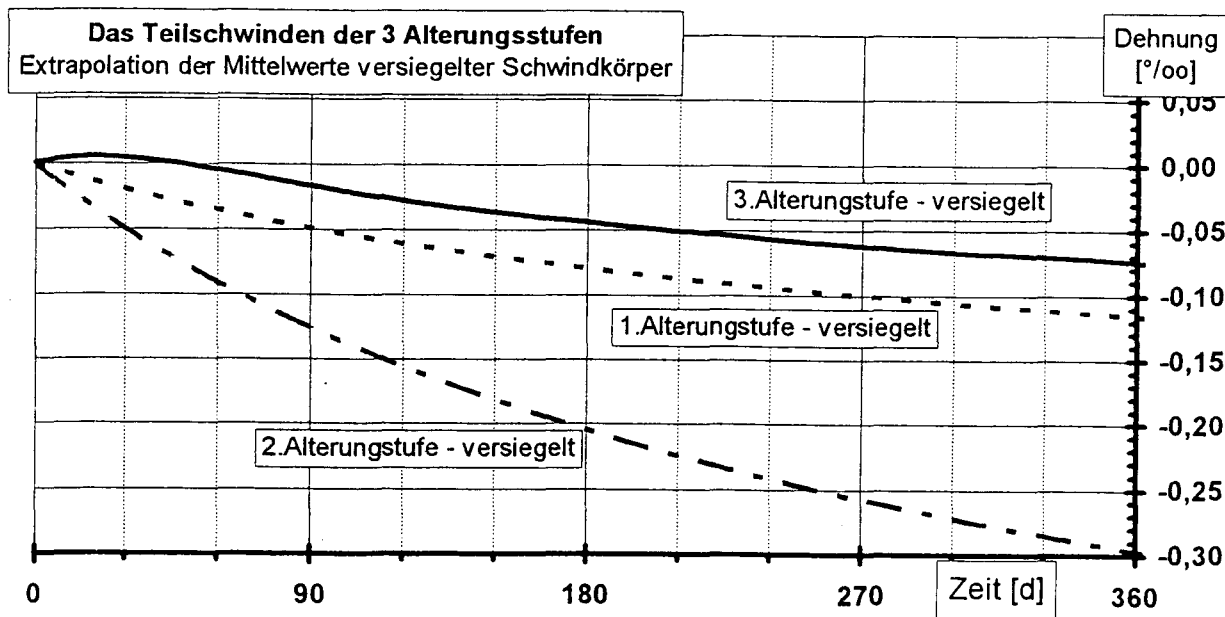
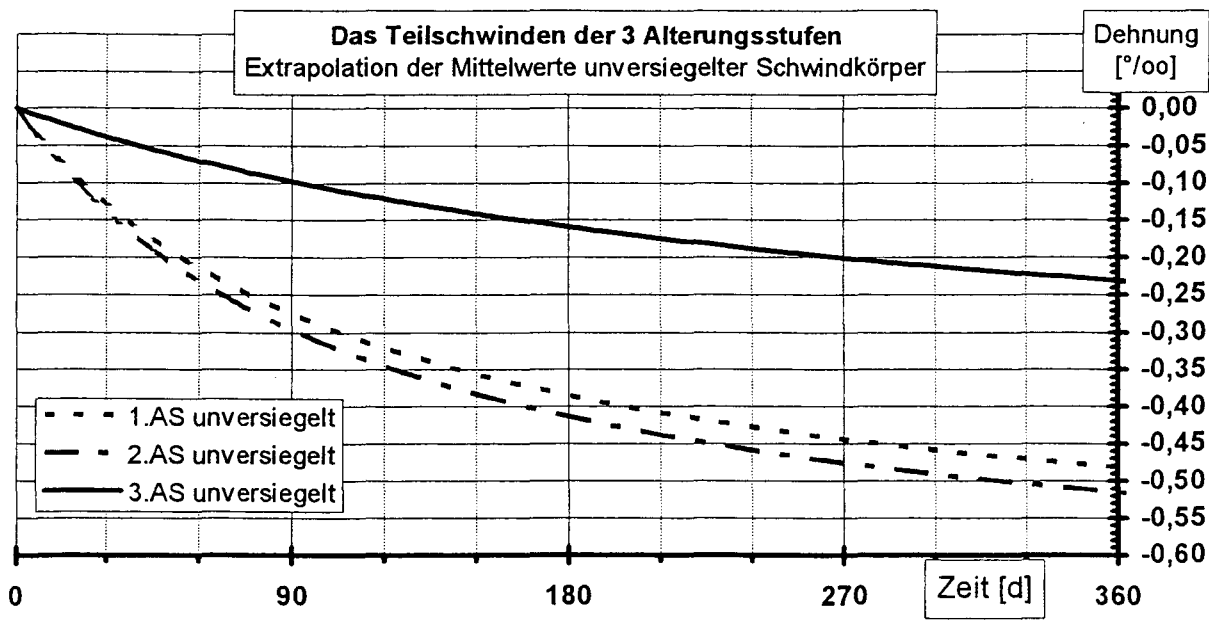
Altersstufe 3

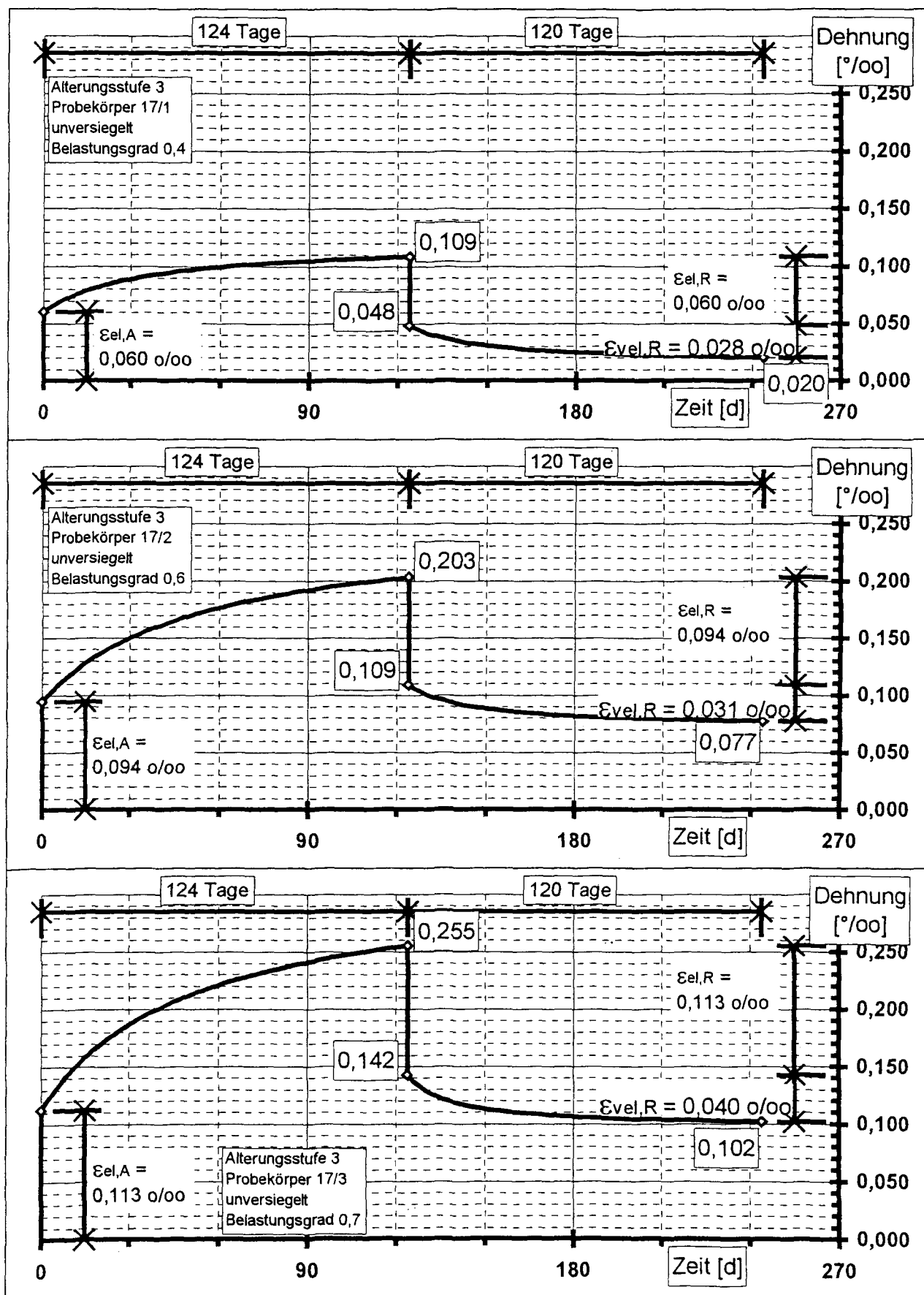
Belastungsalter:

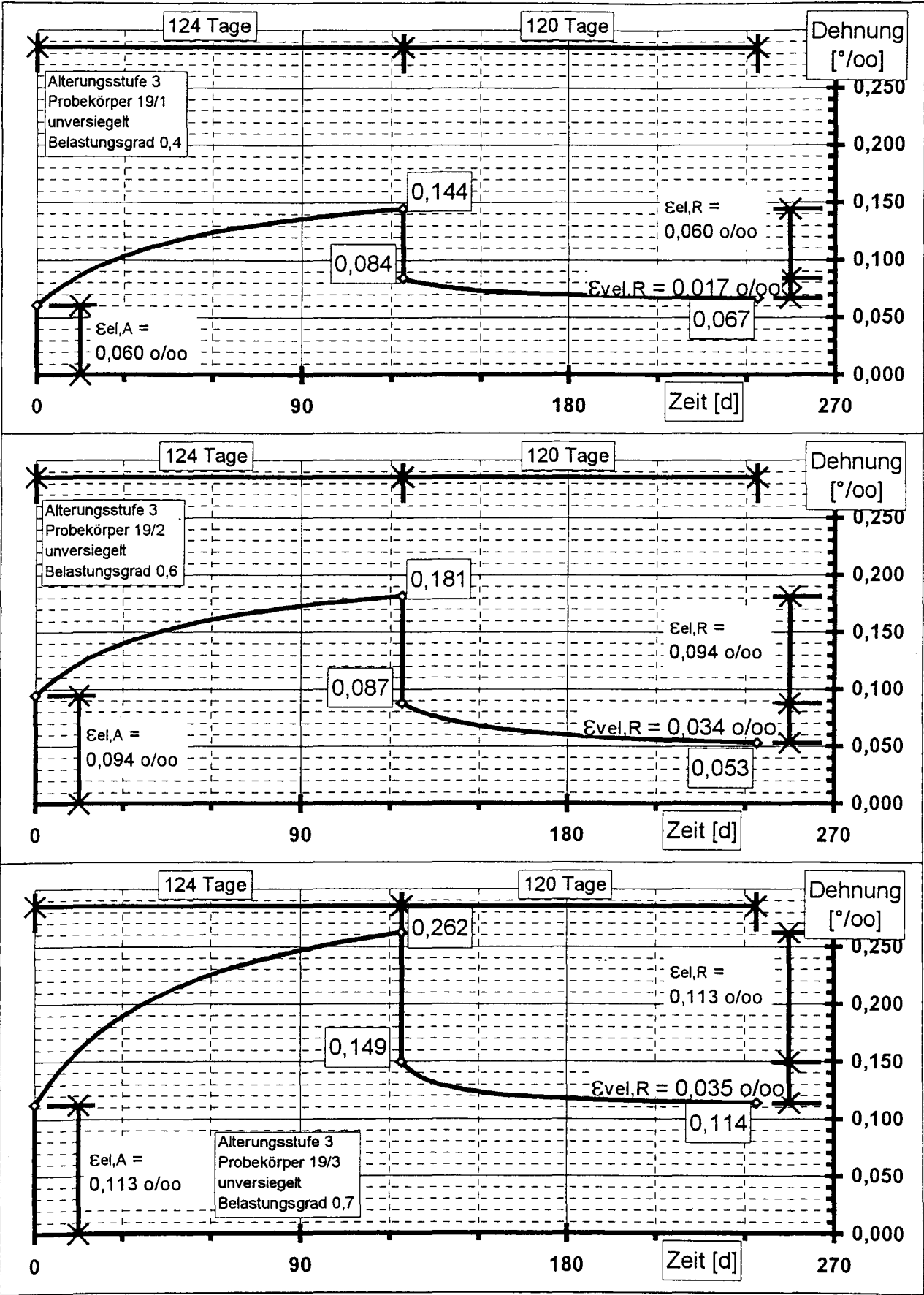
386 Tage

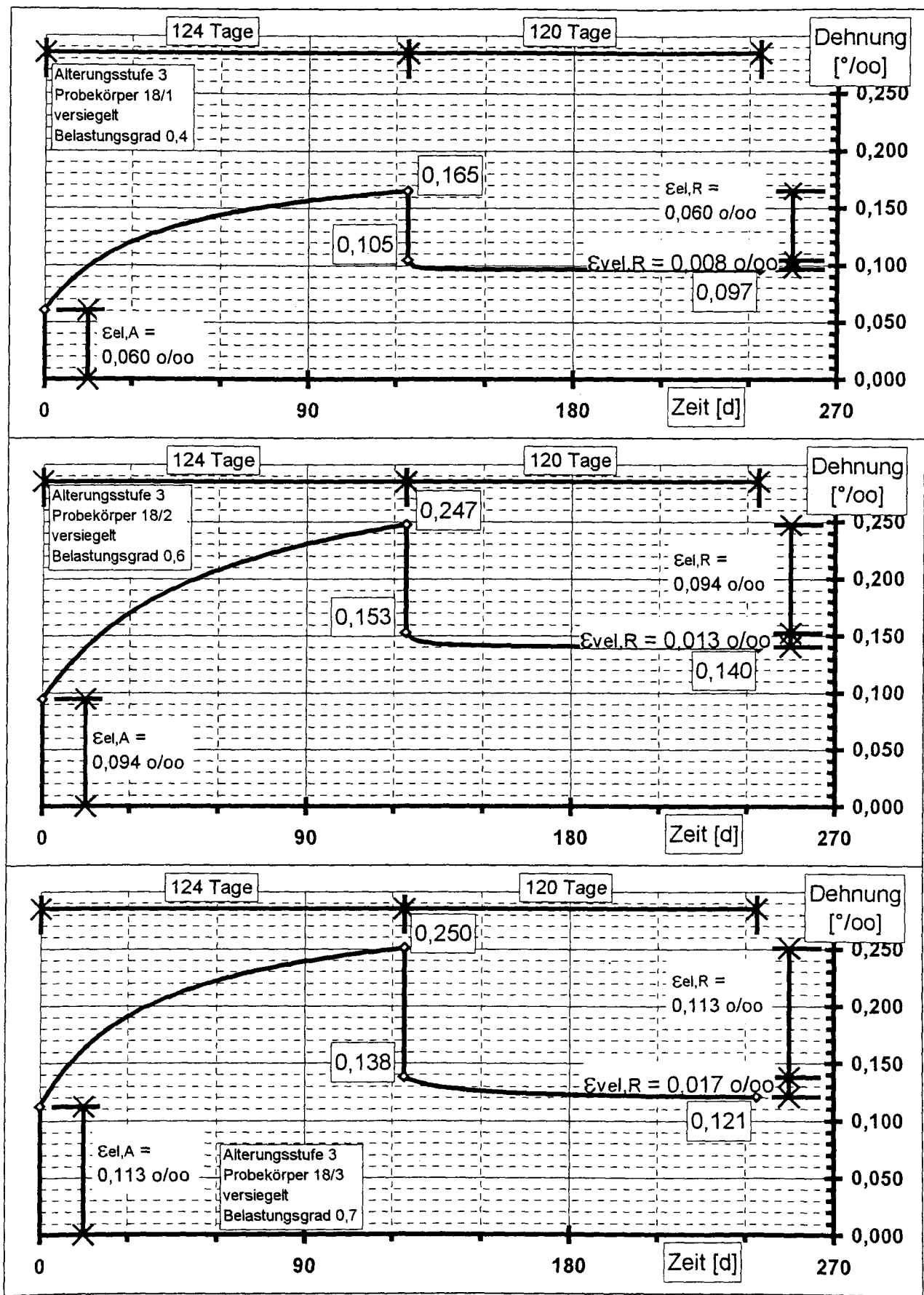
versiegelt

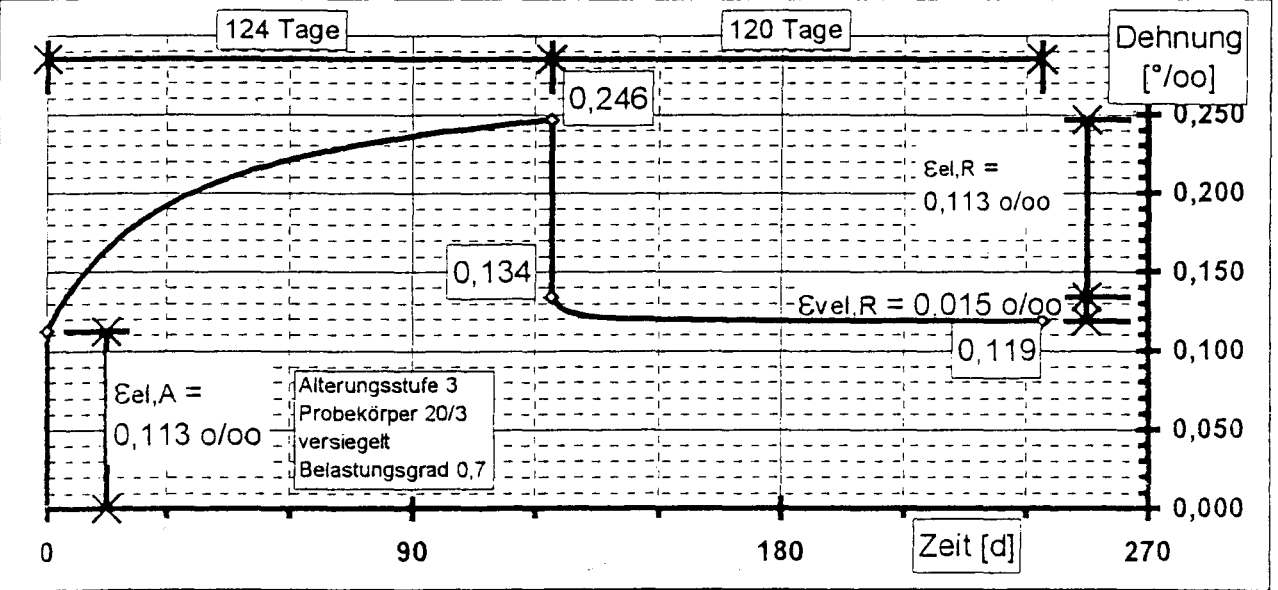
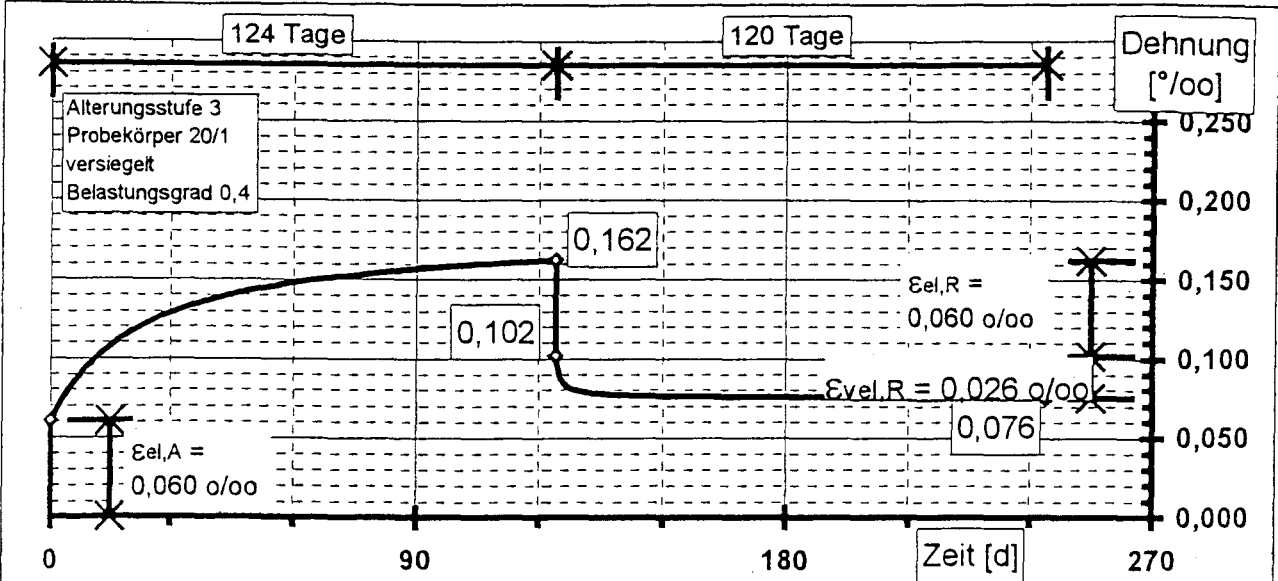
 $f_{ct} = 4,48 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_k = 3,14 \text{ N/mm}^2$ $\epsilon_{e1} = 0,112 \text{ ‰}$



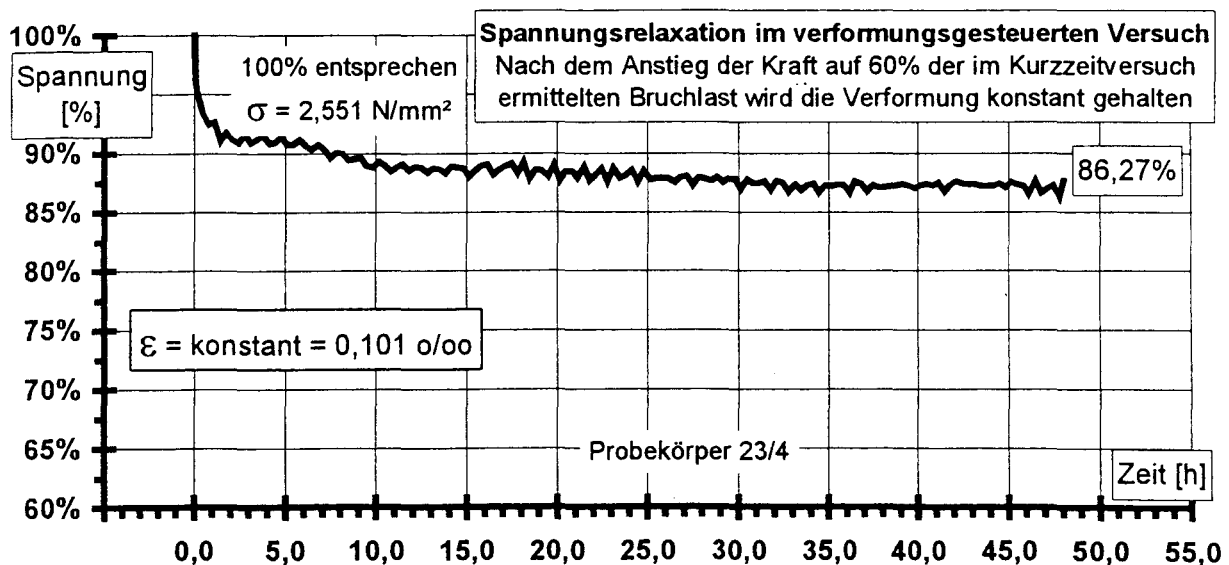
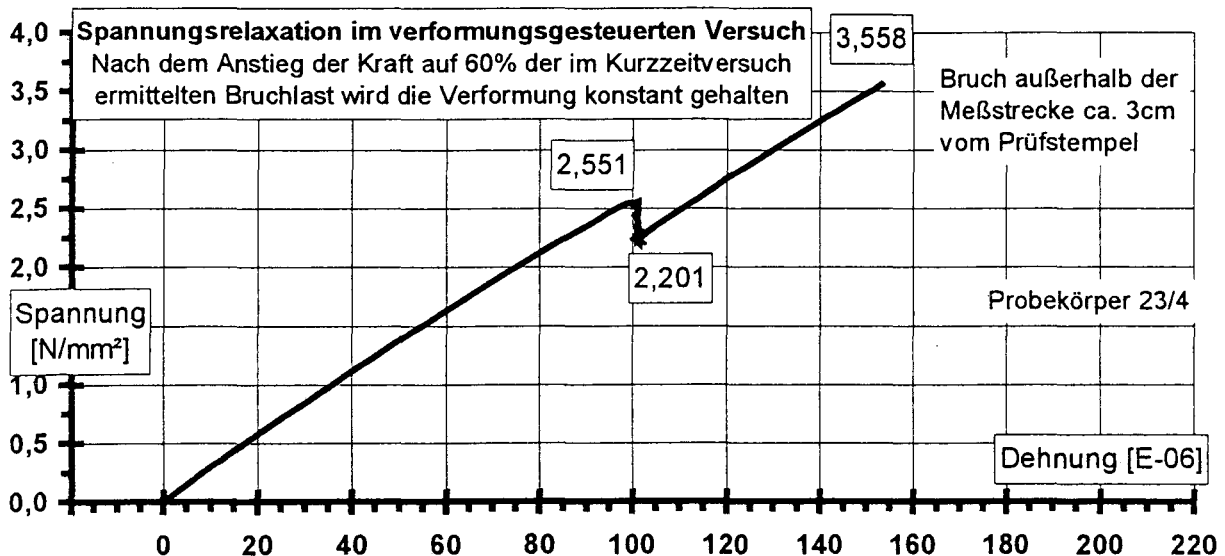
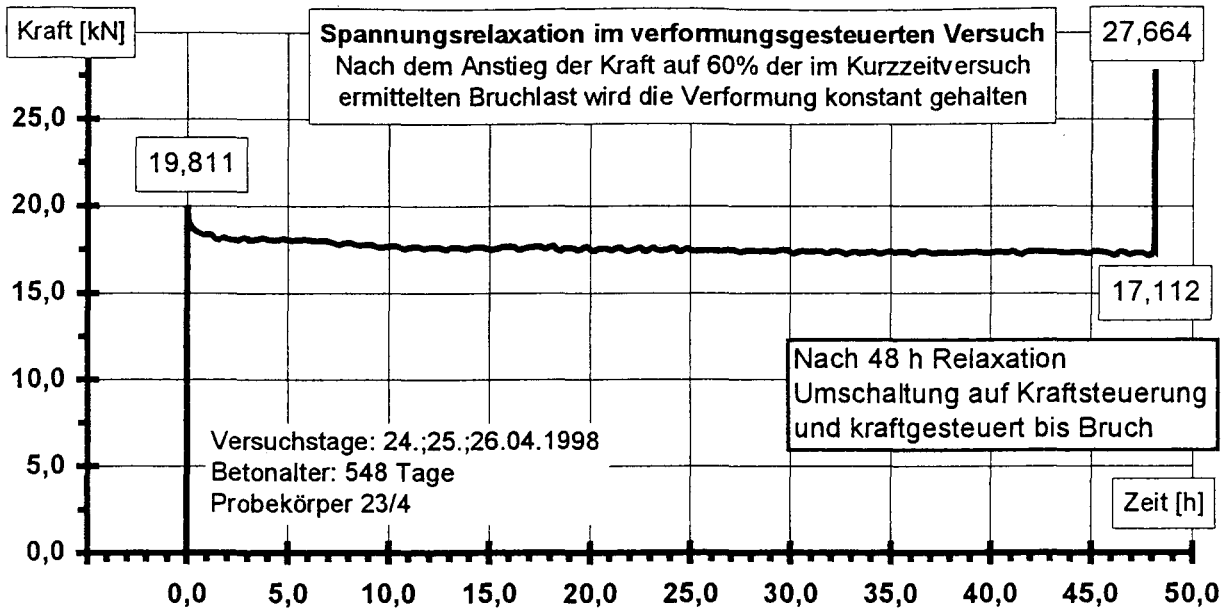




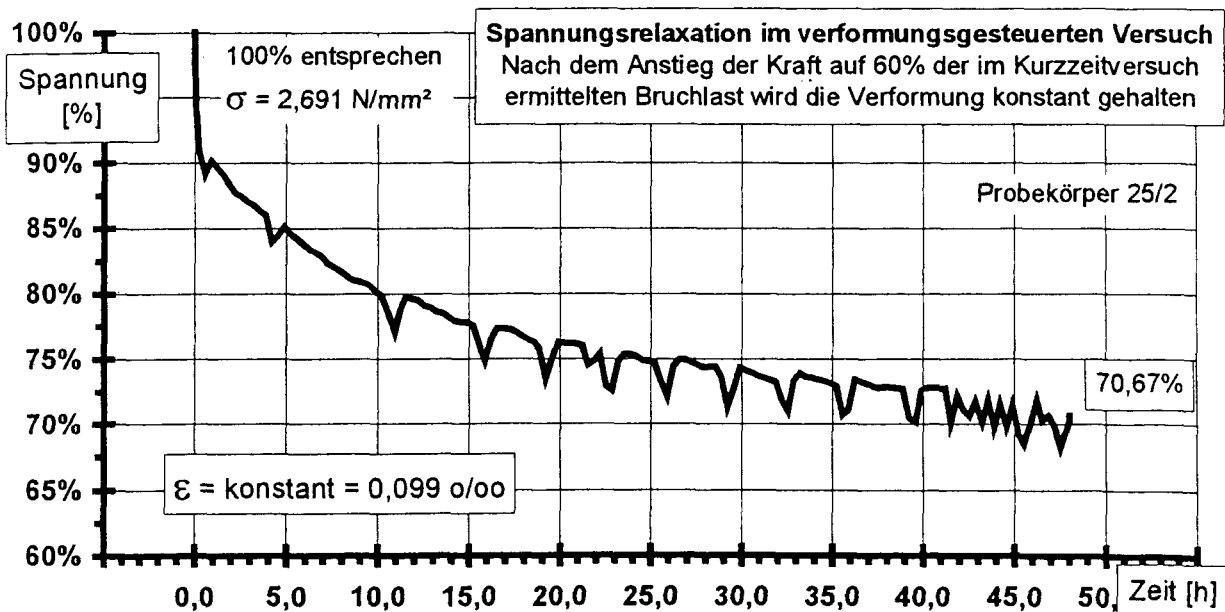
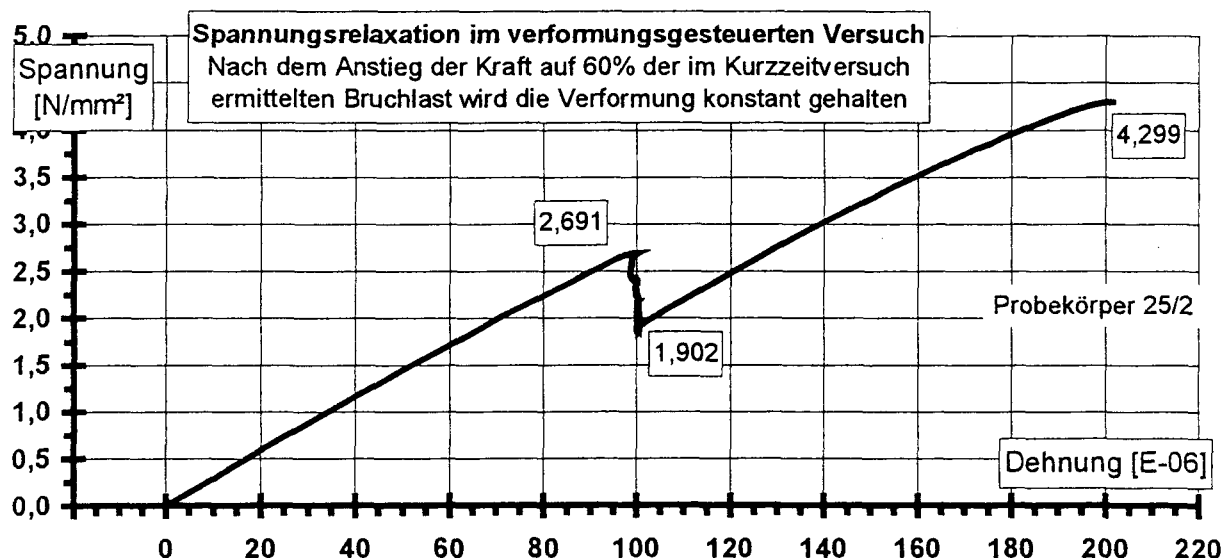
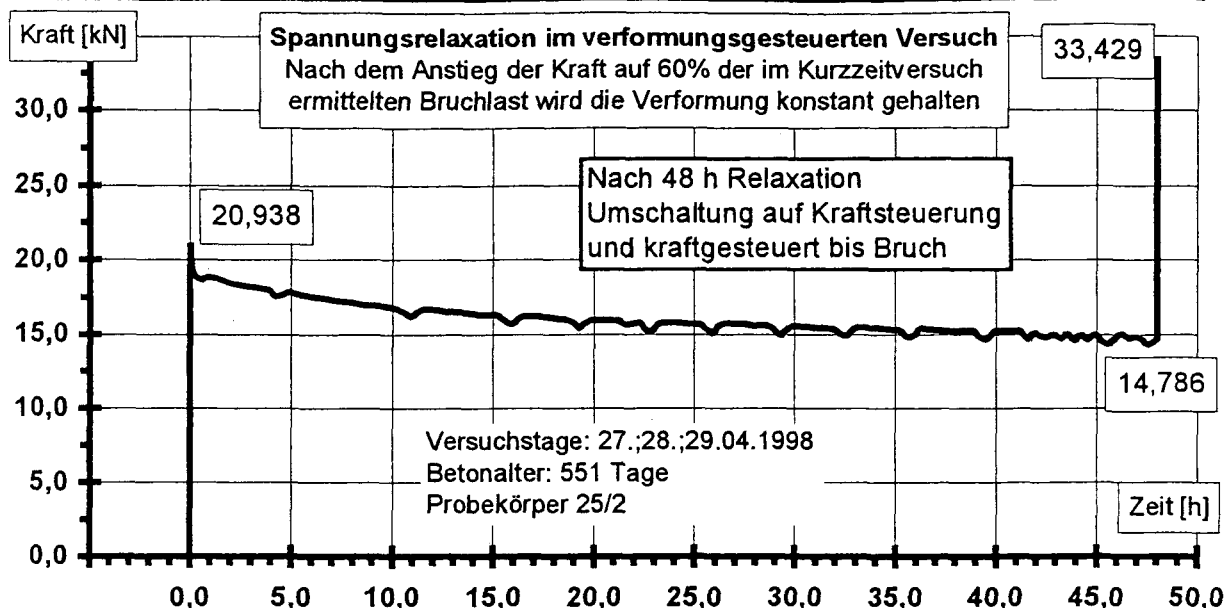




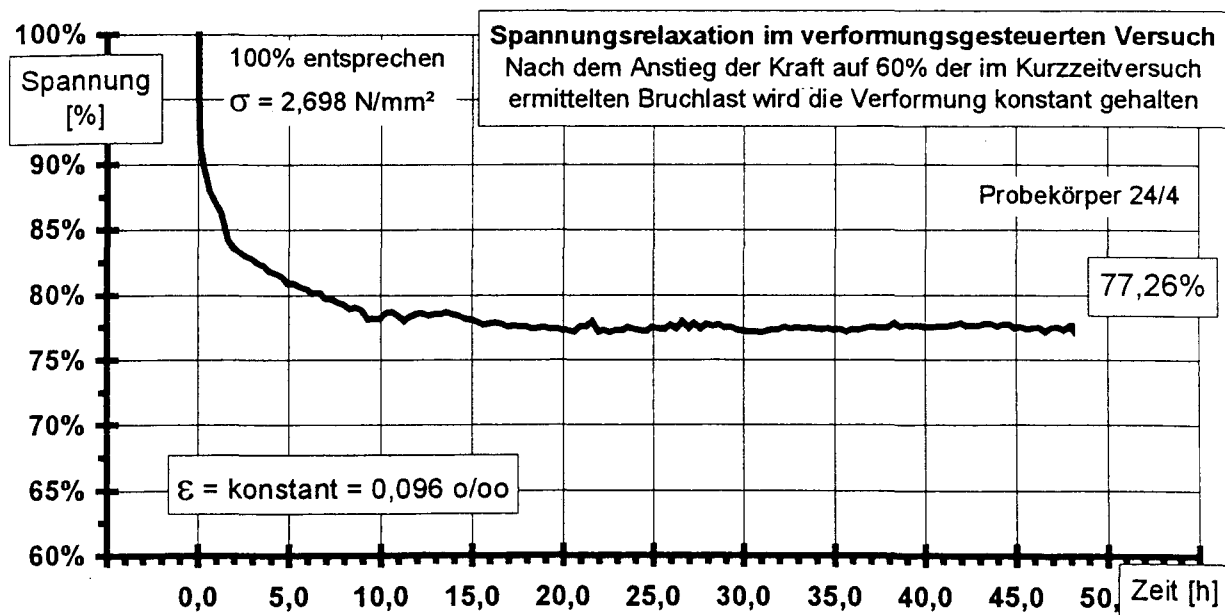
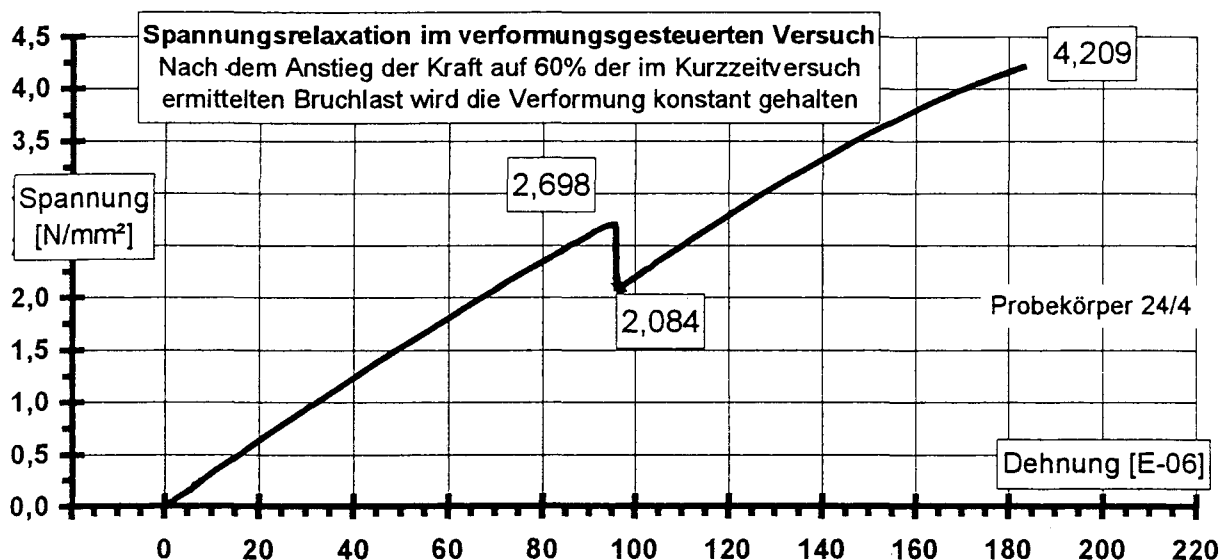
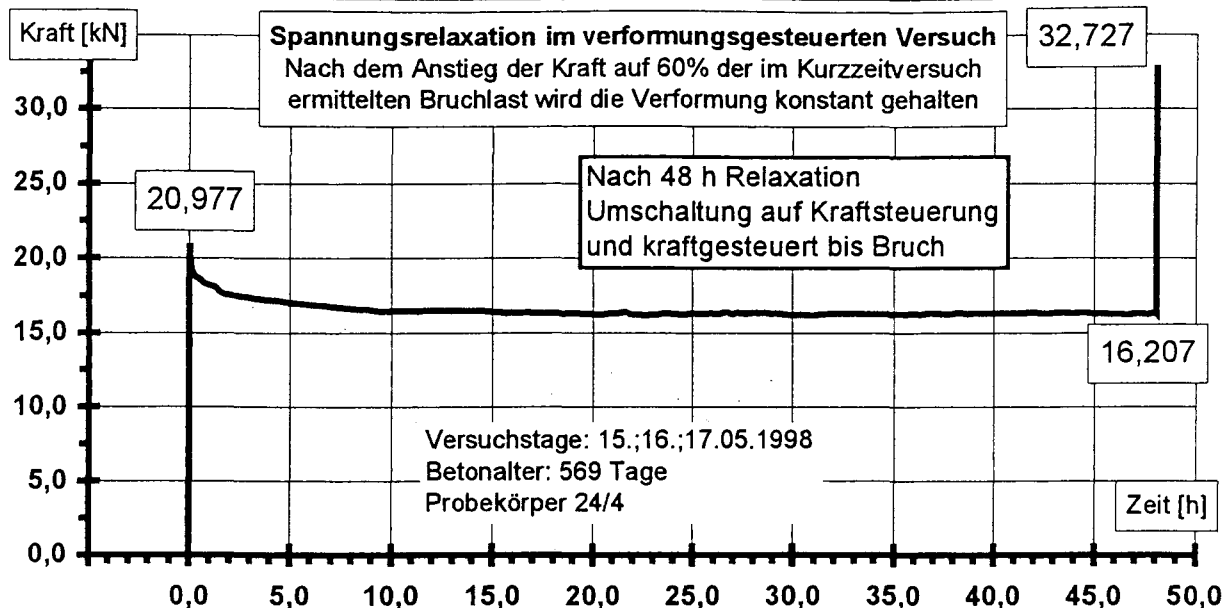
Spannungsrelaxation im elastischen Bereich der Werkstoffkennlinie



Spannungsrelaxation im elastischen Bereich der Werkstoffkennlinie



Spannungsrelaxation im elastischen Bereich der Werkstoffkennlinie



Zement (Mitteilung des Forschungsinstituts der Zementindustrie,
Düsseldorf, Dr. Sieberts)

PZ I 32,5 R "Karsdorf"

Blaine	2950	Probe Sept. 1977
Wasseranspruch	29,5	
Erstarrungsbeginn	180 min	
Erstarrungsende	nicht gemessen	

β_p : 2 Tage	25,4 N/mm ²
β_p : 28 Tage	48,8 N/mm ²

Sulfatgehalt	3,3 Masse-%
Glühverlust	2,6 Masse-%
CO ₂	2,27 Masse-%

Zu Abschnitt 6.1:

Mischungsrezeptur der Betone für Druck-Kriechversuche nach [3]:

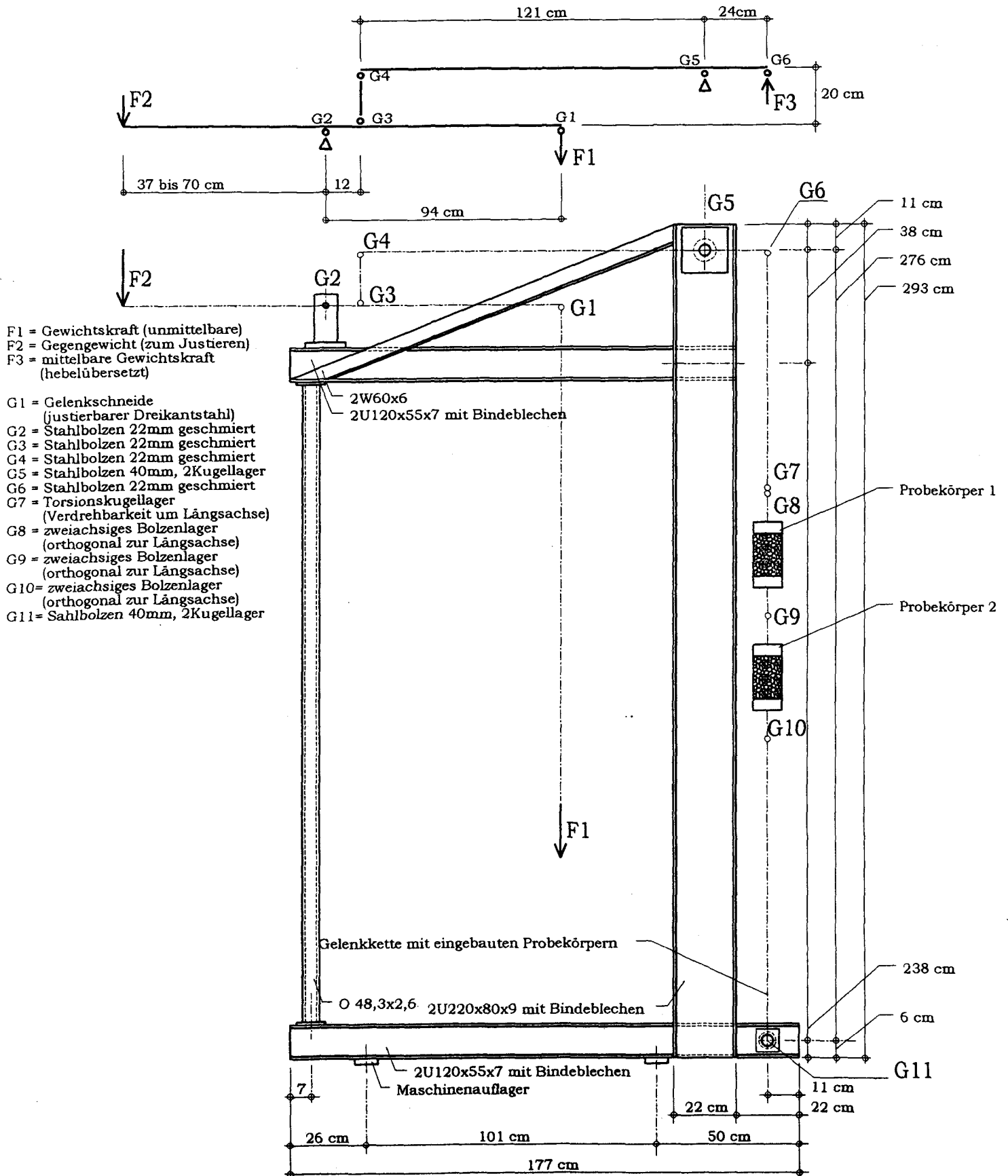
Zement	kg/m ³	337
Wasser	l/m ³	185
W/Z		0,55
Zuschlag	kg/m ³	1850

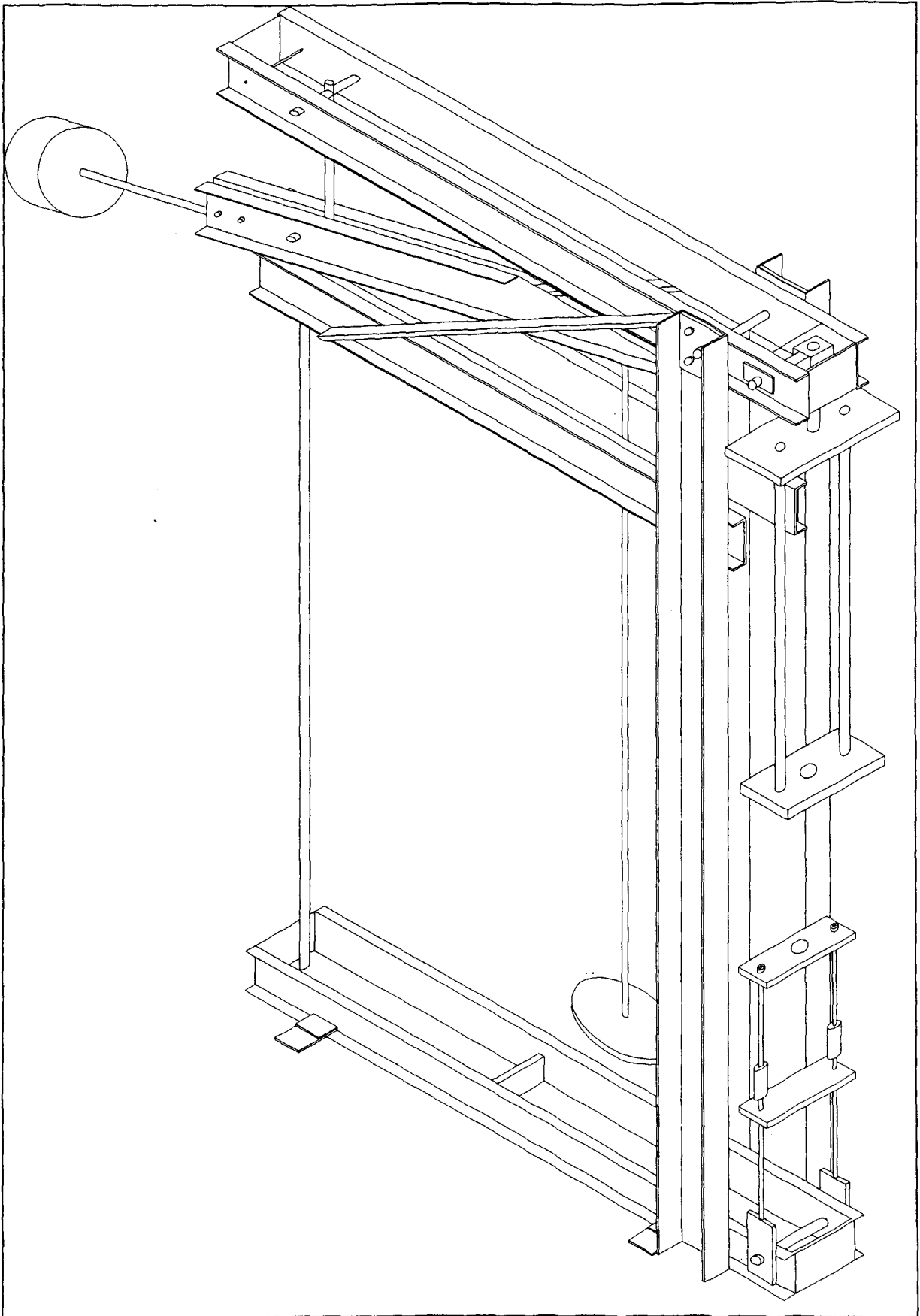
		Zylinder- druckfestigk. nach 28 d N/mm ²	Zylinder- druckfestigk. nach 90 d N/mm ²	φ	Rückkriechen		
					$\epsilon_{K,360}$ ‰	$\epsilon_{R,\infty}$ ‰	$\epsilon_{S,360}$ ab 1 d ‰
I	Rheinkies	22	35	2,5	- 0,098	+ 0,0128	- 0,29
IV	Quarz-Splitt	30	42	2,9	- 0,091	+ 0,0135	- 0,39
V	Carara-Marmor	24	35	1,9	- 0,091	+ 0,0136	- 0,25
VI	Granit	23	42	2,3	- 0,088	+ 0,0140	- 0,29

Kriecherzeugende Spannung 9,8 N/mm²

$\bar{\epsilon}_K$ = Kriechverformung auf 1 N/mm² bezogen

Das statische System des Dauerstandes





Dauerstand in isometrischer Darstellung (ohne eingebaute Probekörper)

Zeitstandprüfeinrichtung 50 kN

Die verwendeten Dauerstände wurden seinerzeit vom Institut für Ingenieur- und Tiefbau für die Baustoff- und Bauteilprüfung entwickelt und hergestellt (1962). Lastbereiche bis 50 kN Zug sind einstellbar.

Die größtmögliche Einspannlänge beträgt 2000 mm.

Die Dicke der Zugkörper ist mit 220 mm begrenzt.



Funktionsweise:

Die Prinzipskizze und das statische System für den Lastbereich Zug zeigt Bild A 31/1.

Vor dem Einbau der Probekörper in den Dauerstand muß dieser zunächst auf die gewünschte Belastung einjustiert werden. Dies geschieht, in dem man zwischen den Gelenken G6 und G11 eine Kraftmeßdose einbaut.

Anschließend wird F1 durch Auflegen von Gewichten erhöht, bis die gewünschte Zugkraft F3 durch Verändern der Entfernung von F2 zum Gelenk G2 genau eingestellt ist.

Dabei ist ebenfalls auf die horizontale Lage der Hebelarme zu achten.

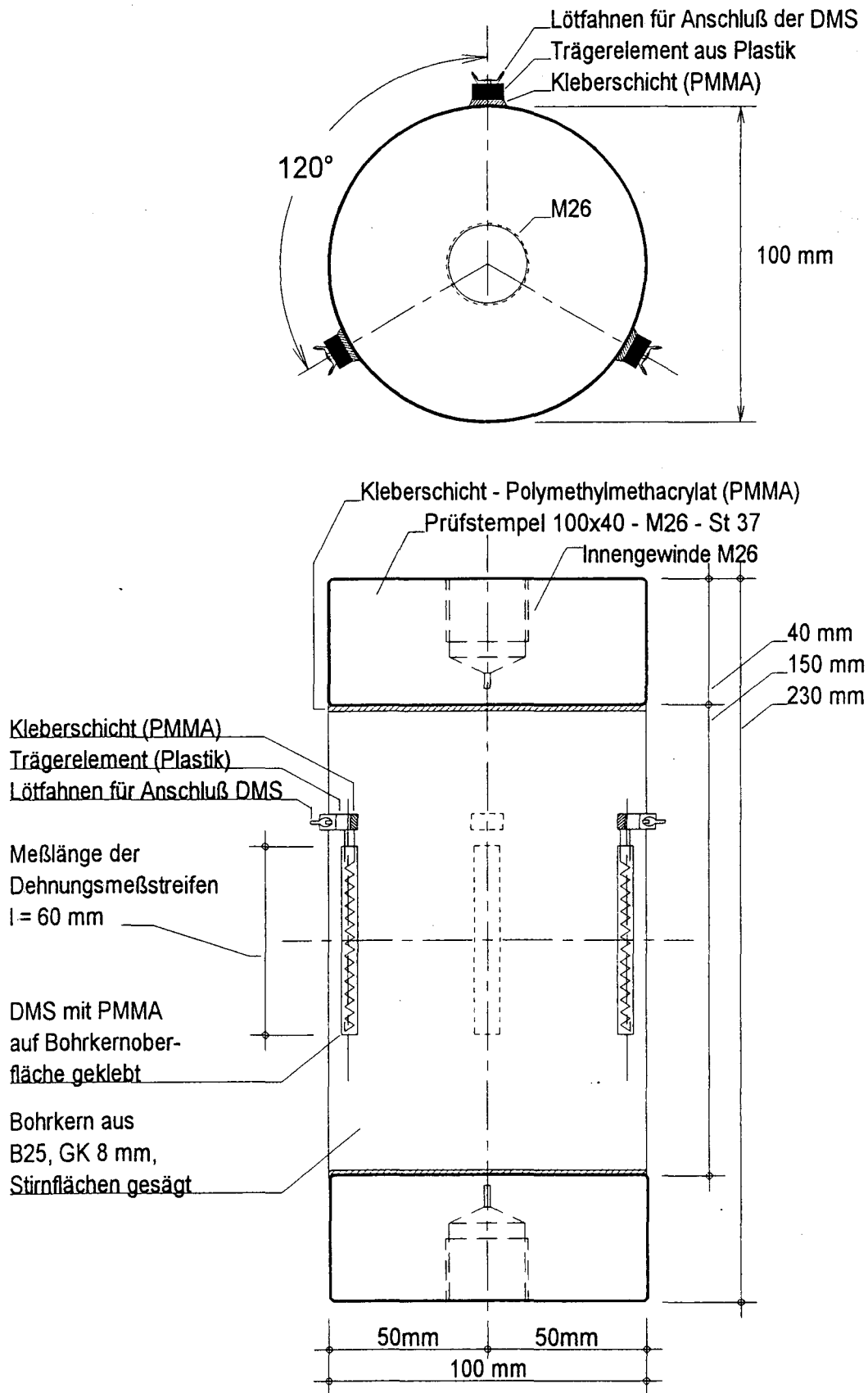
Dies wird über einen an der Zugstange von F1 befestigten Zeiger kontrolliert.

Ist die erforderliche Kraft eingestellt, wird entlastet bis $F_3 = 0$ ist und fixiert. Anschließend wird die Kraftmeßdose ausgebaut und die Gelenkkette mit den Probekörpern installiert. Formschlüssigkeit und Schlupffreiheit sind zu gewährleisten.

Als letztes erfolgt der eigentliche Belastungsvorgang. Die Last ist dabei allmählich aufzubringen, um ein vorzeitiges Versagen der Probe wegen Stoß- oder Schwingungsspitzen auszuschließen.

Auch ist unter dem Gewicht ab Belastungsbeginn eine Abfederung für den Fall des Versagens vorzusehen, da sich ein Aufprall der Gewichte auf den Stahlrahmen auf bereits belastete benachbarte Dauerstände negativ auswirken könnte.

Die Entlastung erfolgt durch Anheben der Gewichte F1.



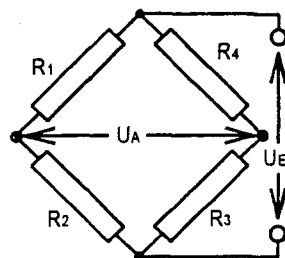
Die Anordnung der Dehnungsmeßstreifen (DMS) auf den für die Zugkriechversuche vorgesehenen Probekörpern.

Wheatstone'sche Brückenschaltung (WB)

nach Hoffmann (1973) und (1987)

Diese Brückenschaltung besteht aus 4 Widerständen. Der Schaltplan:

Widerstände R_i
Ausgangsspannung U_A
Eingangsspannung U_E



Anwendung:

- Messung elektr. Widerstände R durch Vergleich mit Widerständen bekannter Größe;
- Bestimmung von Widerstandsänderungen ΔR (z.B. an DMS);

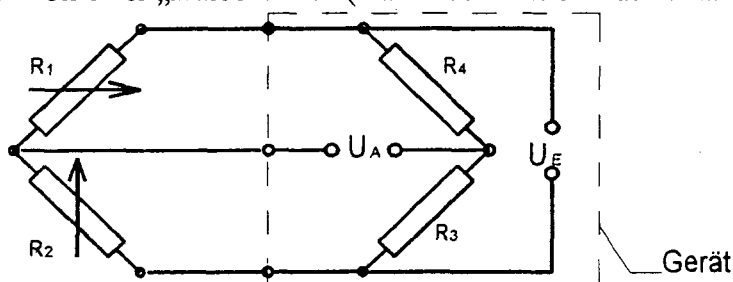
Dehnungen ε des DMS führen zu meßbaren proportionalen Widerstandsänderungen, wobei der Proportionalitätsfaktor k eine experimentell zu bestimmende Kenngröße des verwendeten DMS ist:

$$\varepsilon = 1/k * \Delta R/R$$

Allgemein gilt: $U_A/U_E = R_1/(R_1+R_2) - R_4/(R_3+R_4)$

In unserem speziellen Falle sind die Widerstände R_3 und R_4 als gleich große Festwiderstände im Gerät installiert. Die Widerstände R_1 und R_2 sind zunächst gleich große Widerstände (Nullmessung) und zwar R_1 ein DMS am Kriechkörper und R_2 ein DMS am Schwindkörper. Hierbei spricht man von einer „Halbbrücke“ (Hälfte befindet sich außerhalb des Gerätes).

Der Schaltplan:



Wenn $R_1/R_2 = R_3/R_4$ folgt $U_A/U_E = 0$.

Ändern sich Widerstände in Ihrem Wert erscheint die Spannung U_A als Meßgröße.

Aus U_A/U_E proportional zu $\Delta R_i/R_i = \varepsilon_i$ folgt:

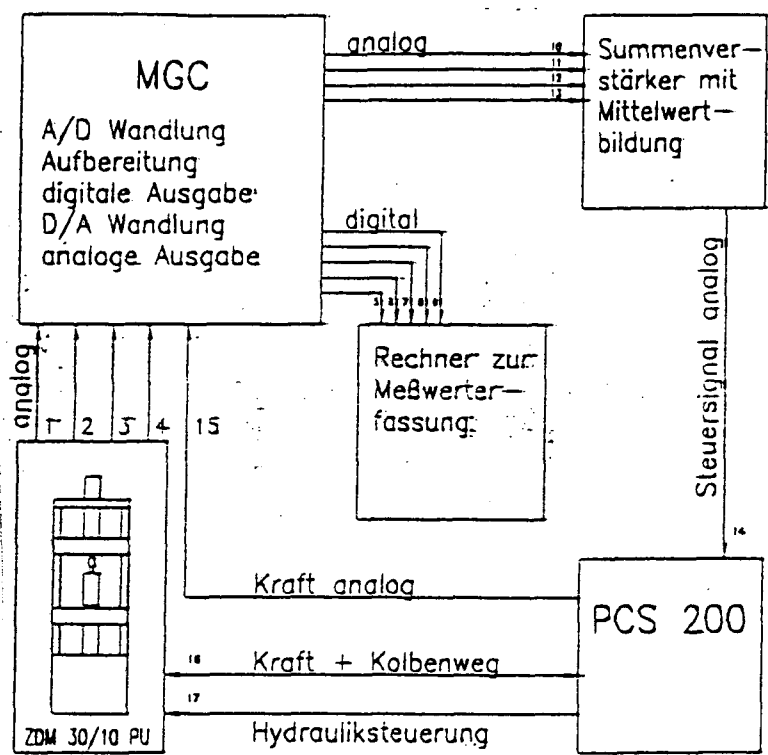
$$U_A/U_E = k/4 * (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Vorzeichenregel:

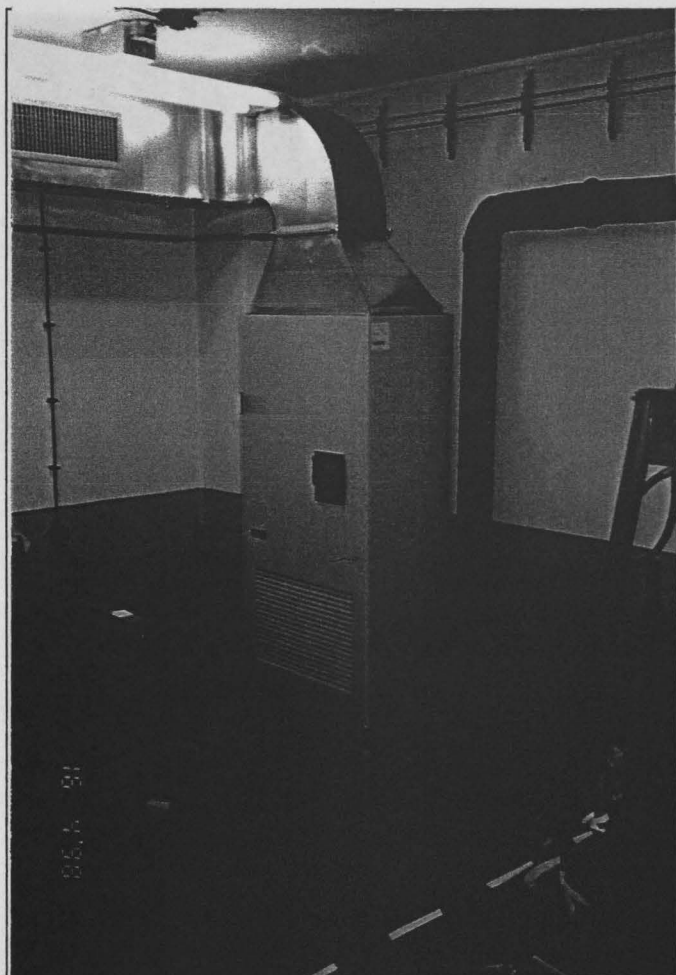
Änderungsbeträge benachbarter DMS subtrahieren sich, wenn sie gleiches Vorzeichen haben, addieren sich bei verschiedenen Vorzeichen.

Dies kann für die Kompensation von Störquellen benützt werden (Temperatur, Feuchte, hydraulischer Druck, Magnetfelder, Kernstrahlung ec.), wobei eine weitestgehende Abschirmung der DMS auf geeignete Weise empfohlen wird.

Die Methode der Kompensation wurde in unserem Falle verwendet, um den „Änderungsbetrag“ des Schwindens aus der Gesamtverformung des Kriechkörpers zu kompensieren. Die Trägerfrequenz der Speisespannung der verwendeten Meßanlage betrug 1kHz.



Steuerung und Meßwertaufnahme der Relaxationsversuche



Klimaanlage

HIROSS Deutschland GmbH;

Gerät SPOT 40-04-A;

Kälteleistung 5,5 kW;

Kondensator luftgekühlt;

Dampfbefeuchter 13 kg;

Außenluftanschluß;

Standort: im Klimaraum;

Die Klimaanlage wurde nach DIN 50 014 „Normklimatetechnik“/Tab.1 auf die Sollwerte:

- Lufttemperatur t : 23 °C;

- relative Luftfeuchte U : 50 %

eingestellt. Die Grenzwerte wurden

mit $\Delta t = \pm 1$ K und $\Delta U = \pm 3$ % festgelegt, so daß

die Einordnung nach DIN 50 014/Tab.2 in

Klasse 1 erfolgt. Die Bezeichnung lautet:

Normklima DIN 50 014 – 23/50- 1;

(Nach DIN 50 013 ist in Ländern mit gemäßigttem Klima eine Normaltemperatur von 23°C für Untersuchungen von temperaturabhängigen Eigenschaften zu bevorzugen.)

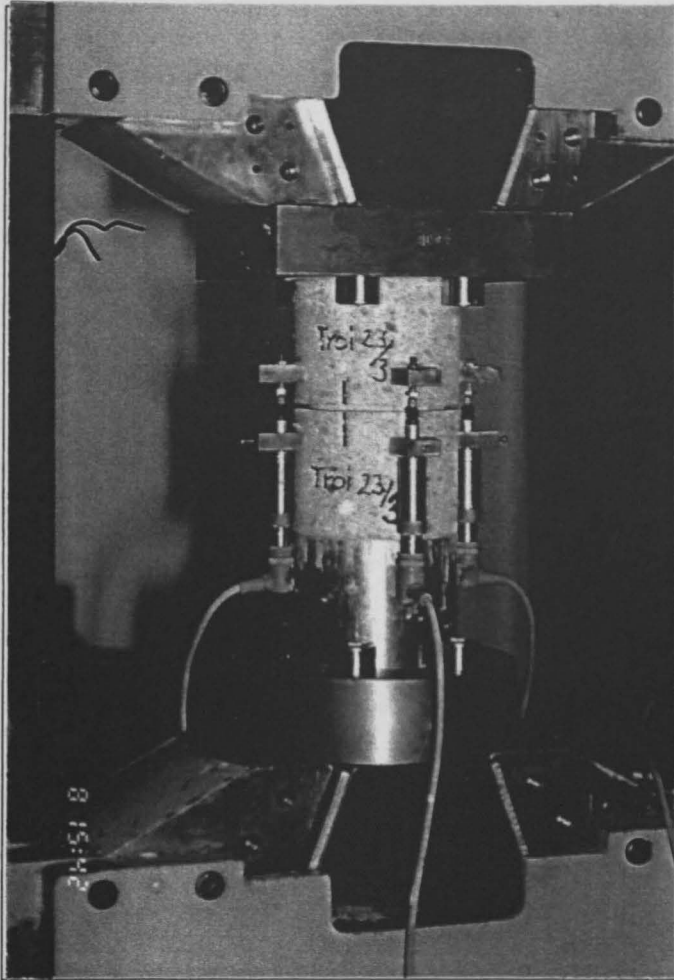
Das Gerät SPOT 40-04-A ermöglicht gleichzeitig die Aufzeichnung eines Klimaprotokolls.

Zur zusätzlichen Kontrolle des Klimas kam ein mechanischer Thermohygrograph zum Einsatz.



Das Foto zeigt den Klimaraum mit Blick auf die 6 Dauerstände während der Entlastung der 3. Alterungsstufe (Rückkriechen).

Die untere Traverse ist vom Gelenk G10 (siehe Anhang A 31/1) gelöst. Die Gewichte F1 sind abgesenkt.



Relaxationsversuch

Für die Versuchsdurchführung ist eine Servohydraulische Prüfmaschine erforderlich. Da Verformungen von 20 bis 30 μm bis zu 48h konstant gehalten werden mußten, war eine Klimatisierung notwendig (Normalklima DIN 50 014 – 23/50- 1).

Die Probekörper wurden als Bohrkerne aus Grundkörpern entnommen. Um das Versagen des Querschnittes örtlich festzulegen und um eine zentrische Lasteinleitung zu gewährleisten, war die Anordnung einer umlaufenden Kerbe praktikabel. Die Verformungsmessung erfolgte über die Kerbe mittels 4 induktiver Wegaufnehmer mit einer Auflösung von 10^{-6} .

Die Kraft wurde mit der in der Prüfmaschine integrierten Kraftmeßdose gemessen.

Im Kerbquerschnitt war bei fortschreitender Entfestigung ein gleich verteilter Dehnungsgradient erwünscht. Dies wurde mit einer Belastungseinrichtung erreicht, die mit hochfesten Schrauben an den Maschinenhäuptern befestigt war (2 Stahlplatten mit je 4 hochfesten Schrauben). Das Zentrieren und Kleben der Probekörper erfolgten in der Prüfmaschine.

Die obere und untere Lagerung des Probekörpers:

- zentrisch;
- vertikal unverschieblich;
- horizontal unverschieblich;
- rotationsbehindert;

Betonprotokoll

Betoniertag: 23.10.96

Auftraggeber: Abt. II und UNI Leipzig, Versuchsleiter: Herr Rukstad

Versuch: Zugversuche (II-701) Kennzeichen: Z61 2

Mischrezeptur nach Anlage: Sorte

Versuchskörper:

Stck	Abmessungen cm	Volumen dm ³	Prüfung auf	Prüfalter Tage/VT	Verdichtung *)	Nachbehandl.* *)
30	W 30		-		IR	FF
6	W 15		DF	VT	RT	FF
	Transportbeton B top:			Lieferanten-Nr.: 51118		
Σ	-	1.3 m ³	-	-	-	-

*) IR=Innenrüttler, RT=Rütteltisch, RB=Rüttelbohle, S=Sonstiges **DIN=DIN 1048 (7/28 Tage Wasser/Luft), F...=feucht/Tage, ISO=ISO 2736 (28 Tage Wasser), S=Sonstiges

Mischer:	75 l []	375 l []	750 l []	TBW []	Anzahl Misch.:	l/Misch.:
----------	----------	-----------	-----------	---------	----------------	-----------

<input checked="" type="checkbox"/> Konsistenzmessung: mit Ausbreitmaß			<input checked="" type="checkbox"/> T - Luft °C: 12 T - Beton °C: 14	
nach	<input checked="" type="checkbox"/>min	<input type="checkbox"/>min	<input checked="" type="checkbox"/> Rohdichte: Beton + Form [kg]	33,75
<input type="checkbox"/> ohne FM	55		Form [kg]	26,90
<input type="checkbox"/> mit% FM			Beton [kg]	46,85
<input type="checkbox"/> mit% FM			Volumen [dm ³]	20,25
<input type="checkbox"/> mit% FM			Rohdichte ρ _{bf} [kg/dm ³]	2,31

<input type="checkbox"/> LP Gehalt [%]		<input type="checkbox"/> Darrprobe Beton	
<input type="checkbox"/> Darrprobe Z + K + FÜ		Masse feucht (mf) [g]	
Masse feucht (mf) [g]		Masse trocken (mt) [g]	
Masse trocken (mt) [g]		ef = 100 (mf - mt) / mf [%]	
ef' = 100 (mf - mt) / mf [%]		wz = ρ _{bf} * ef / Z	
EF' = ef' (Z + K + FÜ) [kg]		wb = ρ _{bf} * ef / (Z + 0,3 FÜ)	

Sonstiges / Feststellungen:

Beton der Sorte 3276 mit 350 statt 370 kg Zement
für 23.10. 93° 1.3 m³

Versuchsleiter:

Zeichen	Prüfung	Alter lage	Abmessungen			Masse kg	Roh- dichte kg/dm ³	Bruchlast kN	Umrech- nung Faktor	Festig- keit N/mm ²
			L mm	B mm	H mm					
8242-1	31.1.92	100	150	150	150	7.69	2.22	976.4	1.0	43.4
-2	h	100	151	150	150	7.72	2.27	969.9	1.0	42.8
-3	f									
Mittelwert:								---	---	43.7
8242-4	20.06.92	250	150	150	150	7.55	2.24	1098	1.0	48.8
-5	4	250	150	150	150	7.56	2.24	1157	1.0	51.4
-6										50.1
Mittelwert:								---	---	
-7										
-8										
-9										
Mittelwert:								---	---	
-10										
-11										
-12										
Mittelwert:								---	---	

Spaltzug an Zylindern:

-13										
-14										
-15										
Mittelwert:								---	---	

E-Modul: (Umrechnungsfaktor bei Ermittlung σ_0 aus Würfeln: $\beta_c = 1/1.18 \beta_w \rightarrow \beta_c = 0.85 \beta_w$)

→

$$\sigma_0 = 1/3 \times \beta_c = 1/3 \times \dots = \dots \text{N/mm}^2 \quad \sigma_u = 0.5 \text{ N/mm}^2 \quad \Delta\sigma = \dots \text{N/mm}^2$$

$$F_0 = 1/3 \times F = 1/3 \times \dots = \dots \text{kN} \quad F_u = \dots \text{kN} \quad l_0 = \dots \text{mm}$$

Nr	E-Modul		Δl ($\Delta l / l_0$)	$\Delta \epsilon$ ($\Delta \epsilon / \epsilon_0$)	E ($\Delta \sigma / \Delta \epsilon$) N/mm ²	Bruchfestigkeit		
	σ_u 10 ³ mm	σ_0 10 ³ mm				A mm ²	Φ kN	β_c N/mm ²
1								
2								
3								
Mittelwert:								

Trockenrohdichte aus Würfel Nr. Mr Probe:g % zu Masse Würfel:%

t* trocknen:g Rohdichte g/cm³

Bemerkungen:

B-top
BTG-Transportbeton
GmbH & Co. KG Großpörsna
Am Bahnhof
04463 Großpörsna
Tel. (03 42 97) 43081
Fax (03 42 97) 42223

3.10.96
21.10.96

A 36/3
B71



Gilt nur für die im Lie
verzeichnis als güteut
ausgewiesenen Beton

Herrn Tisch
FA 3584458

Lieferschein

Kunde:	Materialforschungs-u. Prüfungsanstalt Leipzig Hans-Weigel-Straße 2b 04439 Engelsdorf	Nummer:	3527	Lieferschein-Nr.:	51118
				Datum:	23.10.96
				Beladezeit:	09:17
				Fahrzeug-Nr.:	6
				Abhol:	6
Baustelle	Zone	15	Nummer	I	
S.O.					
				Pol. Kz.:	L-YB 4332
				Verarbeit. barteitszeit:	

Menge/m³	Sorte Nr.	Konsistenz	Zuschlag- gemisch	W/Z	Festigk.- klasse	Verwendung	Eignung	Festigkeits- entwicklung
1,3	333814	KR	GK 8	0.55	B25	Außen/WU	327G	SCHNELL

Zement Nummer	kg/m³	Bezeichnung	Hersteller	Prüfzeichen	bestellte Menge	gelieferte Menge
6	350	I 32,5 R	KARESDORF	DIN 1164		

Zusatzstoff Nummer	kg/m³	Bezeichnung	Hersteller	Prüfzeichen	Zuschläge
8	40	FULLER	SCHOLVEN	DIN 1045	

Zusatzmittel Nummer	kg/m³	%	Bezeichnung	Zugabeort	Hersteller	Prüfzeichen
4	1,75	0,50	BV FK		MC BOTTROP	

Zusammenstellung der Lieferung: Die gelieferte Betonsorte unterliegt fremdüberwachter statistischer Qualitätskontrolle.

NICHT

MENGE I 32,5 R FULLER FRISCHMA BKS 0-2 BK 2-3 BV FK28
1,3 (0456kg) (0048kg) (0184kg) (1320kg) (1020kg) (02,25kg)

SN 01,3	455kg	52kg	183kg	1313kg	1045kg	2,27kg
SN 01,3	456kg	48kg	184kg	1320kg	1020kg	2,25kg

TRANSPORTBETON

Sicherheit in jeder Form

Die Richtlinie zur Nachbehandlung von Beton ist zu beachten! Der Lieferschein gilt als Auszug aus unserem Betonsortverzeichnis.

Alle Lieferungen erhalten Sie auf der Grundlage unserer allgemeinen Geschäftsbedingungen. Beton und Mörtel, die nicht Ihre Bestellung anerkennen wurden.	Der Fahrer ist nicht berechtigt, der Mischung Wasser zuzugeben. Auf dringendes Verlangen und Verantwortung des Empfängers wurden Wasser zugegeben. Damit erlischt die Gewährleistung des Lieferanten für die oben angegebene Betonsorte.	Bemerkung:
Mischmeister	Im Werk übernommen	An Baustelle
		Ende der Entladung
		Standzeit
		Auf der Baustelle in Ordnung übernommen
Unterschrift	Unterschrift	

LIEVERS P14

Der LIEVERS mechanische hochfrequenz-Stockrüttler P-14 ist mit seinem 6-Kilogramm-Einsatzgewicht ein handliches und trotzdem hochleistungsfähiges Gerät, das sich besonders bei Verdichtungsarbeiten in engen oder eng armierten Schalungen, bei kleineren Baustellen und beim Elementebau glänzend bewährt hat.

Eine kleine Hochleistungs-maschine, die im Kofferraum Ihres PKW platz findet, keine Wartung benötigt und mit 220 V. Einphasen-Wechselstrom seine Riesenleistungen erbringt.

TECHNISCHE DATEN RÜTTELFLASCHEN

ø Rüttelflasche	Gewicht KG	Vibr./min.	Fliehkraft	Amplitude	Schlauchlänge
28 mm	2	12.000	2500 N.	0.8 mm	1 - 1.5 - 2 - 2.5 - 3 - 3.5 Mtr.
38 mm	2.5	12.000	3900 N.	1 mm	1 - 1.5 - 2 - 2.5 - 3 - 3.5 Mtr.
45 mm	3	12.000	4500 N.	1.5 mm	1 - 1.5 - 2 - 2.5 - 3 - 3.5 Mtr.

* Standardausrüstung:

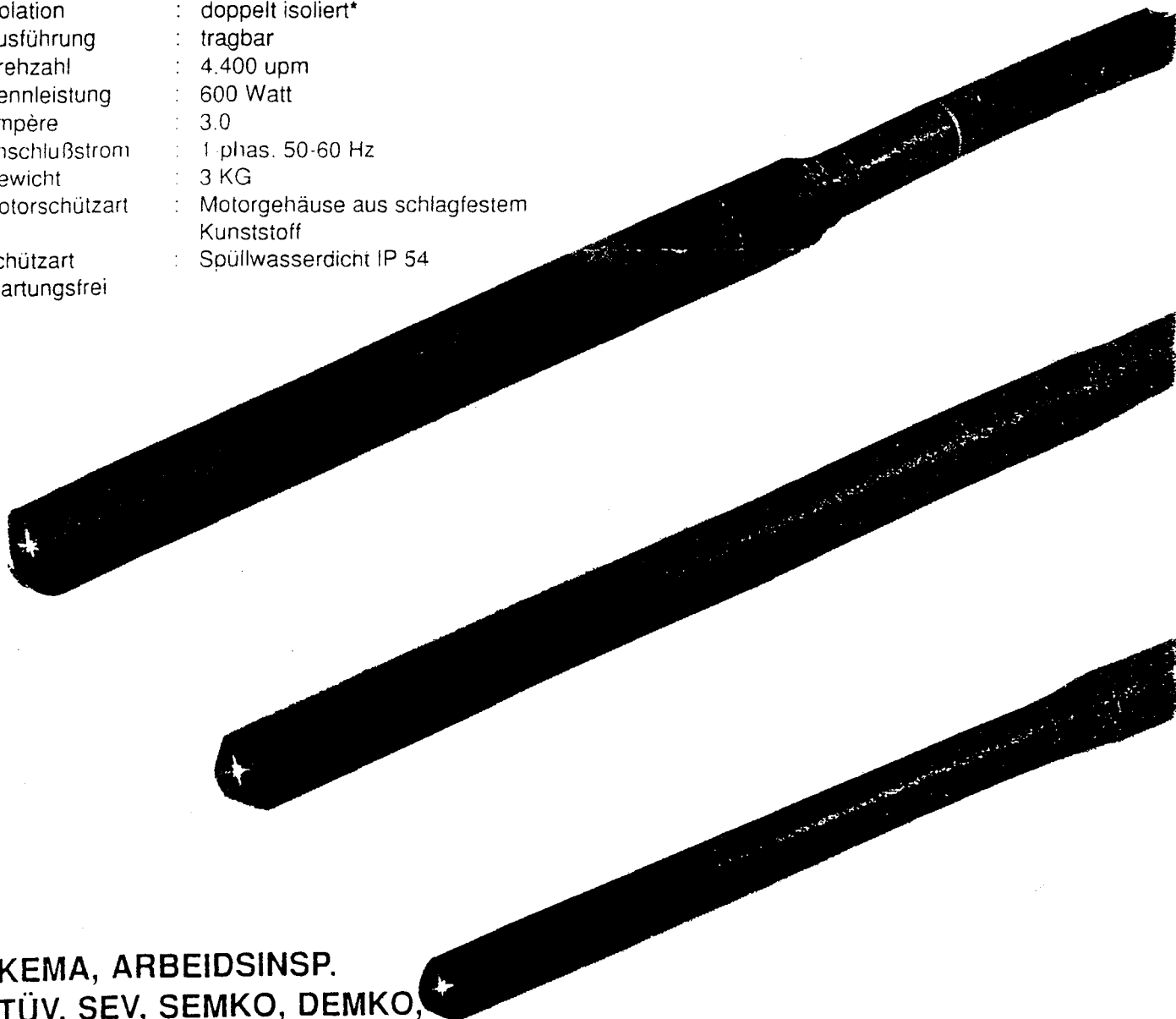
1 meter Schlauchlänge mit Rüttelflasche von 28-38 oder 45 mm.
Antriebsmotor mit Handgriff und 5 m. Kabel.

* Sonderausführung:

Mit Stahlverschlusskappe, Gummiverschlusskappe oder Wechselgewinde für beide lieferbar.

TECHNISCHE DATEN ANTRIEBSMOTOR

Isolation : doppelt isoliert*
Ausführung : tragbar
Drehzahl : 4.400 upm
Nennleistung : 600 Watt
Ampère : 3.0
Anschlußstrom : 1 phas. 50-60 Hz
Gewicht : 3 KG
Motorschützart : Motorgehäuse aus schlagfestem Kunststoff
Schützart : Spüllwasserdicht IP 54
Wartungsfrei



* KEMA, ARBEIDSINSP.
TÜV, SEV, SEMKO, DEMKO,
FINLANDIA

